

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
UNIVERSITE DE BLIDA  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
INSTITUT D'AERONAUTIQUE

*Projet de fin d'étude pour l'obtention du*  
**Diplôme d'ingénieur d'état en aéronautique**  
Option : structure

05/2004  
(MEX)

*Thème*

**Modélisation de la propagation des  
micro-ondes dans les matériaux  
composites**

Proposer par :  
Mr Mourad ZERGOUG  
Mr Ahmed HADDAD

réaliser par :  
REMILI ASSIA

JUIN 2004

# Remerciement

*Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail, en m'apportant leur aide précieuse dans la recherche de l'information et des documents nécessaires.*

*Je tiens à exprimer ma gratitude en particulier à messieurs :*

*S.BERGHEL directeur de l'institut d'aéronautique de Blida, pour l'intérêt qu'il porte à ses étudiants et leur travaux, et l'honneur qu'il me fait de juger mon travail.*

*A.BEN CHAIA directeur du centre de Recherche CSC de Chéraga, de m'avoir permis de réaliser ce projet de fin d'étude au sein du centre.*

*M.ZERGOUG mon prof et mon promoteur et chef du laboratoire d'électronique et l'électrotechnique, de m'avoir fait profité de son savoir et de son expérience.*

*A.HADDAD co-promoteur et attaché de recherche au CSC, pour m'avoir dirigé, et son enthousiasme, sa confiance, et le temps qu'il m'a consacré pour la réalisation de ce projet.*

*A.HAMMOUDA attaché de recherche, pour son soutien et son aide pratique et théorique.*

*M<sup>lle</sup> A.BENKHEDA prof à l'institut d'aéronautique de Blida, pour son aide et ses conseils.*

*Mes remerciement s'adresse aussi à ensemble du personnels du CSC, chercheurs et employées, en particulier Mr N.BOCHEROU. Et l'ensemble du personnels, employées et profs de l'IAB en particulier Mr BENTRAD.*

*Sans oublier tous ceux qui ont participés de près ou de loin à l'élaboration de ce projet. Que tous ce monde trouve ici le témoignage de ma gratitude.*

## Sommaire

<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>3</b>
<b>LISTE DES SYMBOLES</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>5</b>
<b>CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉ SUR LES COMPOSITES.</b>	
1.1 GÉNÉRALITÉS :	10
1.1.1 <i>La constitution des matériaux composites :</i>	11
1.1.2 <i>Classification des matériaux composites :</i>	13
1.1.3 <i>Présentation des composites :</i>	13
1.1.4 <i>L'anisotropie des matériaux composites :</i>	14
1.2 MÉCANISME DE RUPTURE DES MATÉRIAUX COMPOSITES :	14
1.2.1 <i>Les divers défauts possibles dans un matériau composite :</i>	15
1.3 LE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF (CND) :	16
1.4 APPLICATION DU CND DANS LE CONTRÔLE DES STRUCTURES COMPOSITES :	17
1.4.1 <i>La réalisation :</i>	17
1.4.2 <i>La maintenance :</i>	17
1.4.3 <i>Le développement des matériaux composites :</i>	17
1.5 LES DIFFÉRENTES MÉTHODES UTILISÉES POUR LE CONTRÔLE DES COMPOSITES :	17
1.5.1 <i>Limites d'utilisation des techniques de CND :</i>	18
<b>CHAPITRE 2 : LES MICRO-ONDES.</b>	
2.1 DÉFINITION :	21
2.2 PARAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX :	22
2.2.1 <i>La conductivité électrique :</i>	22
2.2.2 <i>La perméabilité :</i>	22
2.2.3 <i>La permittivité :</i>	22
2.2.4 <i>La profondeur de pénétration standard :</i>	23
2.2.5 <i>Les matériaux diélectriques :</i>	23
2.3 EQUATIONS DE MAXWELL :	24
2.4 EQUATIONS D'ONDES :	24
2.4.1 <i>Mode transverse électrique et magnétique (TEM) :</i>	25
2.4.2 <i>Mode transverse électrique (TE) :</i>	26
2.4.3 <i>Mode transverse magnétique (TM) :</i>	27
2.5 LES SUPPORTS D'ONDES :	28
2.5.1 <i>Les lignes de transmission :</i>	28
2.5.2 <i>Guide d'onde :</i>	28
2.6 TRANSMISSION ET RÉFLEXION D'UNE ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE :	31
<b>CHAPITRE 3 : LE CONTRÔLE PAR MICRO-ONDES.</b>	
3.1 PRINCIPE DE CONTRÔLE PAR MICRO-ONDE :	34
3.2 MODE DE MESURE :	35
3.2.1 <i>Par l'onde transmise :</i>	35
3.2.2 <i>Par l'onde réfléchie :</i>	35
3.3 LA CHAÎNE DE MESURE :	36

3.3.1	<i>Le générateur de micro-ondes :</i>	36
3.3.2	<i>Les supports d'ondes :</i>	36
3.3.3	<i>Les antennes :</i>	36
3.3.4	<i>Système d'analyse :</i>	36
3.4	DOMAINE D'UTILISATION DU CONTRÔLE PAR MICRO-ONDES :	38
3.4.1	<i>Détection d'anomalie:</i>	38
3.4.2	<i>Mesure des propriétés des matériaux :</i>	38
3.4.3	<i>Mesure d'épaisseur:</i>	38
3.4.4	<i>Application des micro-ondes sur les métaux :</i>	38
3.4.5	<i>Mesure d'humidité :</i>	38
3.4.6	<i>Imagerie médicale :</i>	38
3.4.7	<i>Autres applications :</i>	39
3.4.8	<i>Précision</i>	39
3.5	MODÉLISATION DE LA PROPAGATION DE MICRO-ONDES DANS LES MATÉRIAUX :	39
3.5.1	<i>Définition de la modélisation :</i>	39
3.5.2	<i>La propagation de micro-ondes dans les matériaux :</i>	40
3.5.3	<i>Modèle de simulation de courbe du signal réfléchi :</i>	41
3.5.4	<i>Algorithme de calcul</i>	44
<b>CHAPITRE 4 : RÉSULTATS DE LA SIMULATION.</b>		
4.1	SIMULATION DU CONTRÔLE DES MATÉRIAUX:	46
4.2	MODE OPÉRATOIRE :	46
4.2.1	<i>Cas d'un matériau classique:</i>	46
4.2.2	<i>Cas d'un composite :</i>	47
4.2.3	<i>Observation générale :</i>	54
<b>CONCLUSION</b>		<b>55</b>
<b>ANNEXE</b>		<b>56</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>		<b>69</b>

# Listes des illustrations

	page
Figure 1-1 : Matériau composite.	10
Figure 1-2 : Différents types de renforts.	11
Figure 1-3 : Classification des matériaux composites.	13
Figure 1-4 : Différentes formes des composites.	14
Figure 1-5 : Rupture d'un composite unidirectionnel.	15
Figure 2-1 : Spectre électromagnétique.	21
Figure 2-2 : Guide d'onde rectangulaire.	29
Figure 2-3 : Méthode d'excitation des guides.	30
Figure 2-4 : Transmission et réflexion d'une onde.	31
Figure 3-1 : Différents modes de mesure par onde transmise.	35
Figure 3-2 : Différents modes de mesure par onde réfléchie.	35
Figure 3-3 : Schéma synoptique des modes de mesure.	36
Figure 3-4 : Les éléments de la chaîne de mesure.	37
Figure 3-5 : Représentation de deux segments élémentaires.	40
Figure 3-6 : <i>Propagation des micro-ondes dans le composite.</i>	42
Figure 3-8 : Algorithme de calcul.	44
Figure 4-1 : Courbe du signal réfléchi pour un matériau classique.	46
Figure 4-2 : Matériau composite.	47
Figure 4-3 : Courbe du signal réfléchi pour un matériau composite sain.	47
Figure 4-4 : Matrice fissurée.	48
Figure 4-5 : Courbe du signal réfléchi pour une matrice fissurée de 0.5mm.	48
Figure 4-6 : <i>Courbe du signal réfléchi pour une matrice fissurée de 0.1mm.</i>	49
Figure 4-7 : Courbe du signal réfléchi pour une matrice fissurée de 0.1mm.	49
Figure 4-8 : Rupture de fibres.	50
Figure 4-9 : Courbe du signal réfléchi pour des fibres fissurées de 1mm.	50
Figure 4-10 : Courbe du signal réfléchi pour des fibres fissurées de 0.1mm.	51
Figure 4-11 : Décollement des couches.	51
Figure 4-12 : Courbe du signal réfléchi pour un décollement de couches.	52
Figure 4-13 : Courbe du signal réfléchi pour un matériau conducteur.	52
Figure 4-14 : Courbe du signal réfléchi pour une couche de peinture de 1mm.	53
Figure 4-15 : Courbe du signal réfléchi pour une couche de peinture de 0.1mm.	54

## Liste des symboles

Symbole	Grandeur	Unité
v	Vitesse de propagation.	$m.s^{-1}$
c	Vitesse de la lumière.	$m.s^{-1}$
D	Induction électrique.	$A.m^{-1}$
B	Induction magnétique.	$v.m^{-1}$
J	Intensité du courant électrique.	A
Z	Impédance.	$v.A^{-1}$
n	Indice de réfraction.	-
$\sigma$	Conductivité électrique.	$s.m^{-1}$
$\theta$	Angle d'incidence.	Rad
$\mu$	Perméabilité magnétique.	$H.m^{-1}$
$\gamma$	Facteur de propagation.	-
$\epsilon$	Permittivité	$F.m^{-1}$
$\delta$	Constante de pénétration standard.	mm
$\chi$	Successibilité électrique.	-
$\beta$	Coefficient de déphasage.	-
$\alpha$	Coefficient d'amortissement.	-
f	Fréquence.	Hz
$\lambda$	Longueur d'onde.	mm
R	Coefficient de réflexion.	-
T	Coefficient de transmission.	-
Ur	Amplitude de l'onde réfléchie.	-
Ut	Amplitude de l'onde transmise.	-

# Introduction

# Introduction

La technologie moderne exige des matériaux une combinaison de propriétés inhabituelle, que les matériaux classiques ne possèdent pas. Pour lors, les recherches se sont orientées sur l'élaboration de nouveaux matériaux rigides, résistant et d'une faible densité, et qui soit résistant à l'abrasion et à l'impact et qui ne se corrode pas facilement. A ce moment-là, on a vu naître les matériaux composites.

Les propriétés des matériaux composites leur confèrent un grand intérêt dans l'industrie. Ils permettent à l'ingénieur de concevoir un matériau qui correspond à la structure désirée et aux sollicitations mécaniques qu'elle devra supporter, et non pas d'adapter la structure en fonction du matériau utilisé. Le concepteur dispose alors d'un matériau dont les caractéristiques mécaniques et physiques sont modulables. Ces avantages leur ont ouvert une large gamme d'application dans la construction automobile, l'aéronautique, ou encore le bâtiment.

Dans l'aéronautique, les matériaux composites apportent des propriétés permettant de les différencier de manière positive des matériaux traditionnels, comme l'amélioration de la durée de vie grâce à leur bonne tenue à la fatigue, la résistance à la corrosion, l'amélioration de la tenue au feu, la simplification de conception, leurs possibilités d'intégration de fonction, l'obtention de formes complexes et leur légèreté.

Pour garantir la qualité de matériau composite lors de la conception, et le suivi de son comportement en service, il est devenu essentiel de faire appel à des méthodes de contrôle adaptées à ce besoin. Le domaine du Contrôle Non Destructif, qui en globe une large panoplie de techniques, met à la disposition de l'industrie des moyens pour l'examen et la caractérisation de ces matériaux.

Chaque méthode est destinée pour satisfaire la demande vis à vis du contrôle d'un matériau donné, une combinaison de plusieurs d'entre elles est parfois nécessaire pour une bonne estimation de l'état de la structure. La plus utilisée de toutes dans le cas des composites, est le contrôle par ultrasons, mais elle ne répond pas de façon complète aux exigences du domaine. De ce fait, les recherches se sont orientées vers l'élaboration de méthodes plus adaptées.

L'utilisation des micro-ondes dans le contrôle non destructif et principalement dans l'inspection des composites est apparue comme une solution aux exigences de l'industrie. Cette technique est basée sur des phénomènes électromagnétiques et leur interaction avec le matériau. Elle présente une nouvelle voie dans la recherche actuelle.

Notre étude consiste à donner une vue d'ensemble sur la possibilité d'application de cette technique, elle se présente en quatre parties, la première présente de manière générale les matériaux composites, leur spécification par rapport aux matériaux classiques, leur constitution, etc. les divers défauts rencontrés, le CND et le besoin du contrôle dans le cas du composite et les différentes méthodes existantes, leur avantages et leurs limitations.

La deuxième partie concerne la définition des micro-ondes comme un phénomène électromagnétique, les lois gouvernant leur comportement, le mode de propagation, les supports d'ondes, leur ressemblance avec les ondes du spectre optiques.

La troisième partie montre l'utilisation des micro-ondes dans le CND. Le principe de base et la chaîne de mesure de la méthode, les différents types de contrôle. En second lieu, elle met en évidence l'approche faite pour la modélisation de la propagation des micro-ondes dans les composites, afin de simuler la réponse du stratifié au signal émis, le modèle utilisé et l'algorithme de calcul.

En quatrième partie, l'exposition des résultats obtenu par la simulation, appliqué dans plusieurs cas représentatifs de ce qu'on rencontre dans la pratique. Et finalement une conclusion sur ces résultats.

## Abstract

Composite materials satisfying certain demands of manufacturers on structure, physical and mechanical properties, etc. are widely used in aviation and sea ship building industry. Non-destructive inspection of composite materials differs from that of metallic materials for two reasons.

Firstly, physical properties such as thermal conductivity, acoustic attenuation, electrical resistivity and elastic behaviour are significantly different. This presents difficulties with the applicability of the physics of some of the techniques. Secondly, and more fundamentally, metallic structures are fabricated from feedstock, e.g. plate, bar and section, of known property, composition and quality. Subsequent inspection usually focuses towards joints, particularly welded connections.

Composites on the other hand are heterogeneous and the material of construction and the component are formed in the one operation. Inspection therefore must be concerned with the whole surface of the structure; a different scale of problem altogether. In addition the range of flaws which may need to be detected is much larger. As a result the NDT of composites is more complex than for metals both in terms of method of application and interpretation of results.

Microwave Nondestructive Testing techniques have advantages over other NDT methods (such as radiography, ultrasonics, and eddy current) regarding low cost, good penetration in nonmetallic materials, good resolution and contact less feature of the microwave sensor (antenna).

Microwave is an electromagnetic wave having a wavelength of 1 to 100 mm. By comparing with ultrasonics, microwave has an advantage that it can propagate well in the air. Therefore, a coupling medium is not necessary when the nondestructive inspection is carried out, and was the best solution in the case of composite. In these paper, we have developed a microwave simulation method for testing composite material, and their application for detecting surface cracks.

## تمهيد

إن التكنولوجيا الحديثة تفرض استعمال مواد ذات خصائص لا تملكها المواد العادية. هذا مما أدى إلى ظهور نوعية جديدة منها وهي المواد المركبة. التي هي عبارة عن اتحاد مادتين أو أكثر لأجل الحصول على خصائص معينة غير موجودة في المواد المكونة لها.

يحتاج المستعمل لهذه المواد إلى تقنيات تضمن له جودتها. و تقنيات الكشف دون تدمير تضع في متناوله مجموعة من الطرائق التي تمكنه من مراقبة و معرفة خصائصها دون المساس بصحتها. أحدث هذه التقنيات هي الكشف باستعمال الميكرواف. التي تلبي معظم ما يحتاج إليه هذا المجال. وهي تتركز على الظواهر الكهرومغناطسية وتجاوب المواد معها.

أ هذا يقوم بإعطاء نظرة شاملة على قواعد وتقنيات الكشف بالميكرواف و إبراز بصفة خاصة أهميتها في مراقبة المواد المركبة. كما أننا قمنا بمحاكاة هذه التقنية على الكمبيوتر للكشف عن بعض العيوب الممكن مصادفتها في المواد المركبة في الميدان.

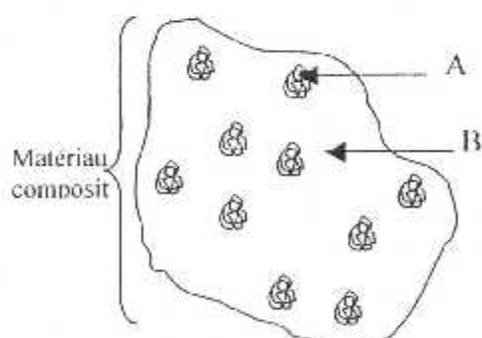
## Chapitre 1

# Généralités sur les matériaux composites

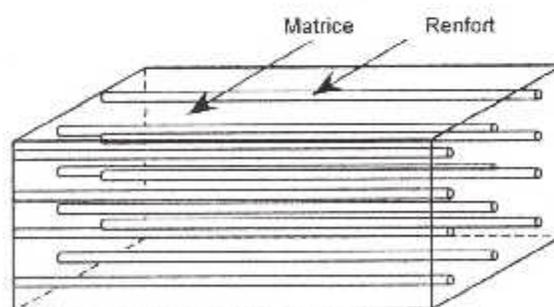
## 1.1 Généralités :

Le matériau composite peut être défini comme une ou plusieurs phases discontinues dans une phase continue. La phase discontinue est plus résistante et plus dure que la phase continue, elle est appelée **renfort**. La phase continue est le plus souvent appelée **matrice**.

Les matériaux composites offrent d'excellentes caractéristiques spécifiques par rapport aux matériaux classiques, si un matériau classique (A) a des propriétés données et un autre (B) offre d'autres propriétés différentes de celle de premier, la combinaison entre (A) et (B) peut avoir des propriétés que chaque composant pris à part ne possède pas.



Matériau composite quelconque.



Matériau composite à fibre longue.

**Figure 1.1 :** Matériaux composites.

Il existe deux types de composite :

- Les composites grandes diffusions (GD) représentent 95% des composites utilisés. Ce sont en général des plastiques armés ou des plastiques renforcés, le taux de renfort avoisinant 30%. Dans 90% des cas, l'anisotropie n'existe pas ou n'est pas maîtrisée car les renforts sont des fibres courtes. Les principaux constituants de bases sont les résines polyesters (95% des résines thermodurcissables) avec des fibres de verre (plus de 99% des renforts utilisés). Les renforts et les matrices sont à des coûts voisins.
- Les composites hautes performances (HP), leur principal domaine d'application est l'aéronautique et ils sont d'un coût élevé. Les renforts sont plutôt des fibres longues, et c'est leur proportion dans le matériau qui influe sur le coût, le taux de renfort est supérieur à 50%. Contrairement aux GD, les propriétés mécaniques comme la résistance mécanique et la rigidité sont largement supérieures à celles des métaux.

### 1.1.1 La constitution des matériaux composites :

Les composites sont fabriqués à partir de plusieurs types de matériaux, suivant le domaine d'application pour les quels ils sont destinés. La matrice et le renfort n'ont pas nécessairement la même nature et ils sont définis tel que :

#### 1.1.1.1 Le renfort :

Sa fonction est d'assumer les charges et les efforts, il apporte au matériau des performances mécaniques élevées. Il se présente généralement sous forme de particules, de fibres courtes ou longues et dont l'orientation au sein du composite dépend de la sollicitation mécanique qu'elles doivent supporter. Ils peuvent être de différente nature.

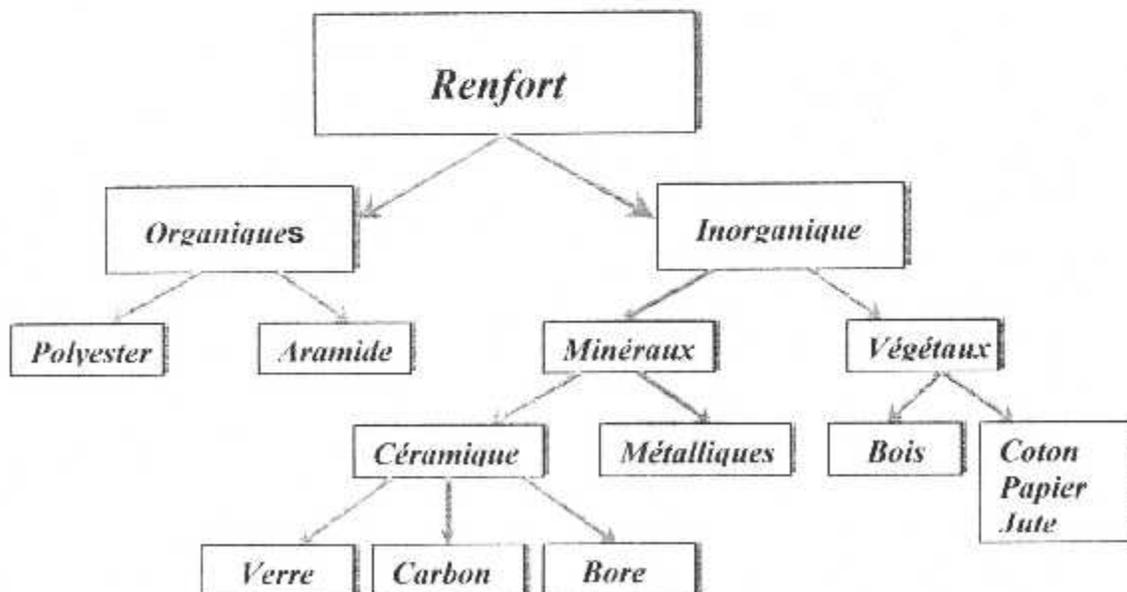


Figure 1-2 : Différents types de renforts

Notre étude se portera sur les composites unidirectionnels à base de fibre longue, les plus utilisés dans le domaine structural de l'aéronautique.

### 1.1.1.2 La matrice :

Sa fonction est de réaliser la liaison entre les renforts, de leur transmettre les efforts, d'assurer leur protection vis-à-vis des agents agressifs, et de répartir les sollicitations prévenant ainsi la rupture catastrophique et de donner forme à la pièce. Elles peuvent être de différente nature, tel que :

- *Polymères*: (Thermodurcissables, Thermoplastiques). Ces matrices contribuent peu dans le support des efforts, elles sont utilisées principalement pour maintenir les fibres en place. Les thermodurcissables sont particulièrement utilisés vu qu'elles sont faciles à élaborer et relativement à coût moyen.
- *Métaux*: (Al, Ti, superalliages). Ce type de matrices a une significative mais habituellement non dominante contribution dans le support de l'effort. Elles ont aussi une haute température de contrainte thermique. Elles sont choisies aussi, quand la conductivité thermique et électrique est requise.

Le coût d'élaboration du matériau augmente avec l'augmentation de la température de fusion de la matrice. La matrice métallique tend à avoir une réaction avec les fibres communément utilisées, ce qui implique l'utilisation de fibres avec un coefficient de protection pour survivre au procédé.

- *Céramiques*: (verre-céramiques, céramiques). Ces matrices apportent la contribution la plus dominante dans le support des contraintes. Le rôle des fibres dans les matrices en céramiques est d'augmenter leur dureté. Incorporer les fibres dans les matrices en céramiques est généralement plus difficile que pour les matrices métalliques, à cause de leur très haute température de fusion.
- *Minérales*: (carbone amorphe...). Ces matrices sont surtout utilisées pour de grandes contraintes thermiques comme dans le cas du nez des missiles. La procédure d'incorporation des fibres dans le carbone est très laborieuse, lente et coûteuse.

### 1.1.1.3 L'interface matrice-renfort :

Un autre élément très important entrant dans la définition des composites, qui est l'interface matrice-renfort et sa nature, qui détermine la qualité du matériau puisqu'elle assure la compatibilité entre les constituants et la transmission des contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif, sa nature est dictée suivant le type de contraintes imposées dans le cahier de charge.

### Remarque :

Cependant, Il existe au sein du matériau composite d'autres éléments qui lui sont indésirable : les trous ou porosités. L'art de fabrication sera de les minimiser, voire de les éliminer.

### 1.1.2 Classification des matériaux composites :

Les composites sont classifiés suivant plusieurs critères pour la convenance de l'industrie. Le type de matrice est souvent utilisé pour décrire le composite. Les désignations les plus communes basée sur le type de matrice sont : PMC (*Polymer Matrix Composites*), MMC (*Metal Matrix Composites*) et CMC (*Ceramic Matrix Composites*). Les composites sont aussi classifiés sur la forme du renfort et sa continuité, la figure suivante montre cette classification :

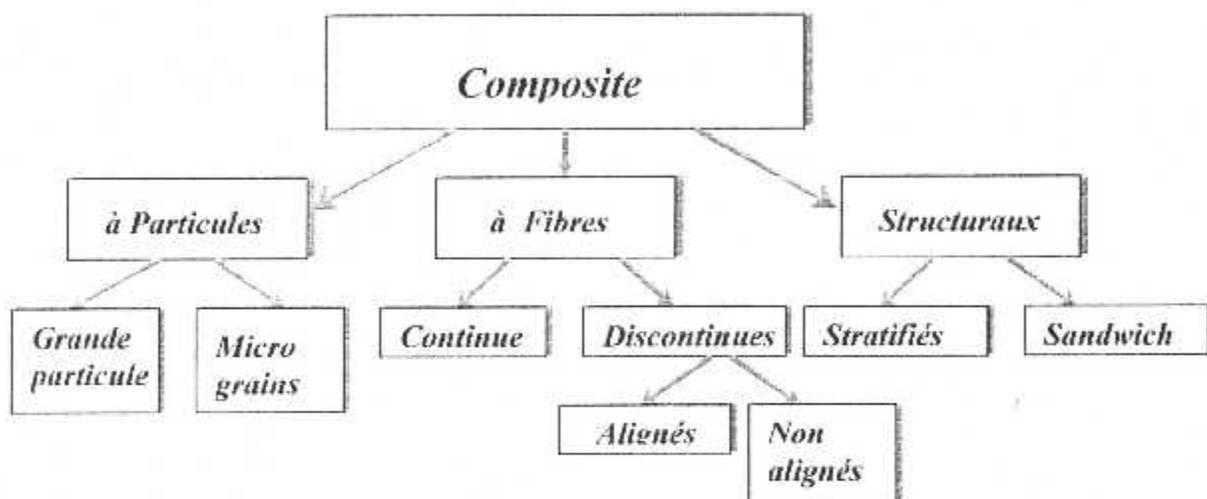


Figure 1- 3 : Classification des matériaux composites.

### 1.1.3 Présentation des composites :

Les composites se présentent sous plusieurs formes élémentaires à partir des quel on constitue la structure composite :

- **Pli** : C'est une nappe élémentaire dans la constitution du stratifié.
- **Couche** : C'est un ensemble de plis identiques empilés avec la même direction.
- **Tissus** : C'est un assemblage de mèches entrelacées (tissage).

Les composites sont commercialisés sous plusieurs forme dont :

- **Stratifié** : Il est constitué de deux ou plusieurs couches (ou pli) successives de renfort (fils, mats, tissus, etc.) noyé dans de la résine.
- **Sandwich** : C'est une structure qui est faite de deux feuilles (peau) horizontales et une structure verticale très légère appelée âme (mousse, nid d'abeille, etc.) comprise entre les deux premières.

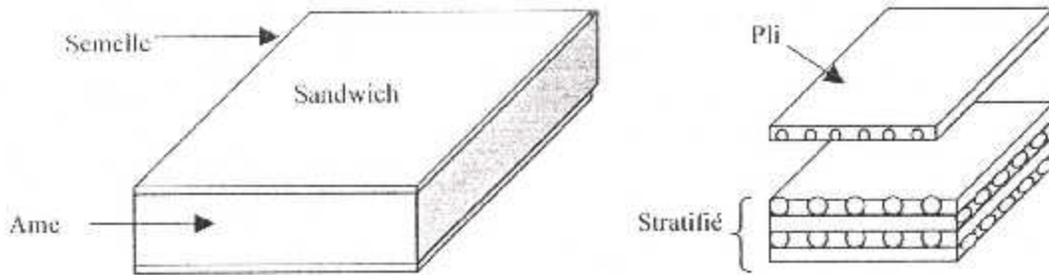


Figure 1.4 : Différentes formes des composites.

### 1.1.4 L'anisotropie des matériaux composites :

Un matériau est dit anisotrope si ses propriétés diffèrent suivant la direction considérée comme c'est le cas des composites, c'est l'orientation des renforts qui est responsable de ce phénomène. On parle alors de propriétés suivant la *direction transversale* des fibres, et des propriétés suivant la *direction longitudinale* des fibres.

### 1.2 Mécanisme de rupture des matériaux composites :

On désigne par mécanisme de rupture, tout processus mécanique engendrant au sein du matériau une discontinuité locale de matière appelée crique ou fissure. Il est caractérisé par deux phases, la première est celle de l'initiation, qui est la création de microfissures à l'échelle microscopique à partir d'un défaut existant. L'initiation de la fissure se fait sans qu'on remarque un changement du comportement macroscopique.

La seconde phase est la phase de propagation de la fissure, c'est le résultat de création de nouvelles surfaces de discontinuités à l'échelle macroscopique, on parle alors dans le cas des matériaux composites de macrofissuration,

C'est l'accumulation de plusieurs mécanismes élémentaires, qui est responsable de la rupture finale d'un composite unidirectionnel, ces mécanismes élémentaires sont, la fissuration des fibres, la fissuration transverse ou longitudinale de la matrice, la fissuration de l'interface fibre-matrice, dans le cas réel ces divers mécanismes coexistent et ils ne sont pas isolés.

1- **La rupture des fibres** : Elle survient lorsque la contrainte de traction  $\sigma_f$  dans une fibre atteint la contrainte à la rupture  $\sigma_{fu}$  de la fibre, le processus de rupture résultant dépend principalement de la contrainte à la rupture des fibres, de la capacité de la matrice à absorber l'énergie libérée et des propriétés de l'interface fibre-matrice, etc. (Figure 1.5 – a).

- 2- **La fissuration de la matrice** : Elle se produit soit dans la direction longitudinale, lorsque la contrainte de cisaillement  $\tau_m$  atteint la contrainte de cisaillement à la rupture de la matrice  $\tau_{mu}$ , généralement au voisinage d'une fibre (Figure 1.5 – b). Ou bien dans la direction transverse lorsque la contrainte de traction  $\sigma_m$  atteint la contrainte à la rupture de la matrice  $\sigma_{mu}$  (Figure 1.5 – c).
- 3- **Rupture de l'interface** : Ce dernier mode de rupture est appelé « splitting » par les Anglo-saxons, se produit lorsque la contrainte de décohesion est supérieure à la contrainte en cisaillement à la rupture de la matrice :  $\tau_d > \tau_{mu}$ . (Figure 1.5 – c).

Les figures suivantes illustrent les différents processus de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre.

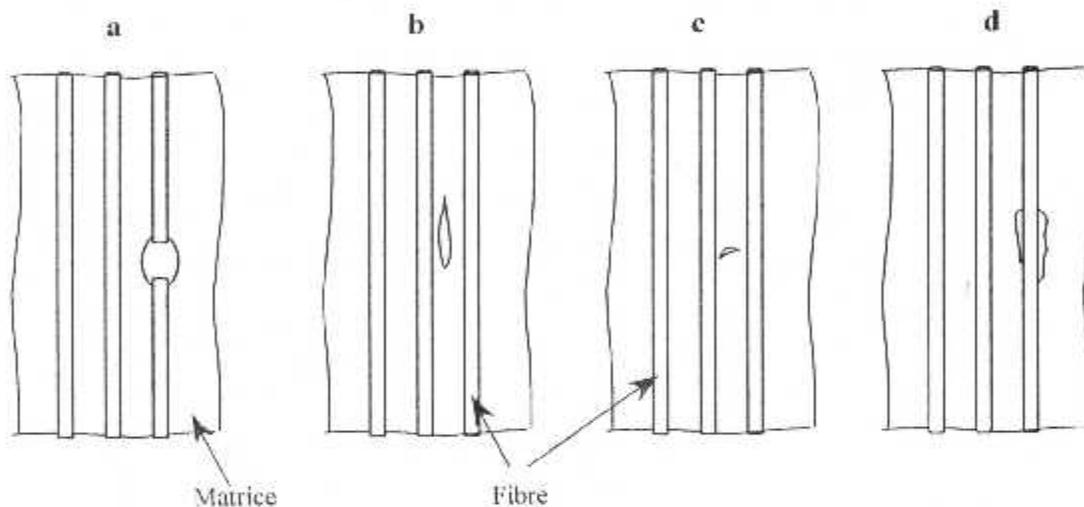


Figure 1.5 : Rupture d'un composite unidirectionnel.

### 1.2.1 Les divers défauts possibles dans un matériau composite :

Le matériau peut avoir une multitude de défauts de diverse origine qui font en sorte le fragilisé, est qui aboutissent à sa rupture :

- La fissure des fibres.
- La fissure transverse et longitudinale de la matrice.
- La fissure de l'interface fibre-matrice.
- Vides et les porosités.

- Déformation des fibres ou de la matrice.
- Décollement des couches.
- Variation de densité.
- Inclusion de l'eau ou d'autres liquides.
- Intégrité du métal et d'autres dispositifs inclus dans ou collés sur la structure.
- Dommages durant la fabrication et en service.
- Etat inexact de traitement.

Ces défauts surviennent lors de la vie en service du matériau sous l'effet de la fatigue, de la corrosion, des accidents, etc. Comme ils peuvent être créés durant l'élaboration du matériau, son usinage, etc. Il devient alors important de concevoir des méthodes de Contrôle Non Destructif adaptées aux besoins spécifiques au cas des matériaux composites.

### **1.3 Le Contrôle Non Destructif (CND) :**

Le CND est un ensemble de méthodes destiné pour le contrôle et la caractérisation des matériaux et des structures, de façon à ne pas endommager leurs intégrités. Les divers essais se basent sur l'interaction des matériaux avec une source d'énergie (rayonnement dont la nature est déterminée par la longueur d'onde).

Les rayonnements excitateurs utilisés dans les diverses méthodes de CND couvrent le spectre électromagnétique, des plus petites longueurs d'ondes au plus élevées .

- Les rayons Gamma et les rayons X sont utilisés dans la radiographie.
- Les ultraviolets utilisés dans la visualisation des défauts par magnétoscopie.
- Le spectre lumineux visible est employé dans les méthodes optiques comme la borroscopie.
- Les infrarouges, tel que la thermographique.
- Les micro-ondes.
- Les courants de Foucault.

On retrouve aussi d'autres phénomènes employés dans le CND, tel que Les ondes mécaniques ultrasonores.

## **1.4 Application du CND dans le contrôle des structures composites :**

Plusieurs domaines nécessitent la présence du CND pour la garantie de la qualité du composite, et cela lors de :

### **1.4.1 La réalisation :**

Au cours de la fabrication, il est nécessaire de contrôler :

- Le degré de cuisson.
- Taux de porosité.
- Taux de fibres.
- L'interface fibre-matrice.
- L'orientation des fibres.
- Détection d'inclusion.
- Détection de fissuration précoce.

### **1.4.2 La maintenance :**

Pour estimer l'importance de l'endommagement en vue de la réparation et la détermination de sa qualité, le CND permet de contrôler les matériaux après :

- La fatigue.
- Un choc.
- Les vibrations.
- La surcharge statique.
- Les problèmes d'environnement tel que Humidité, Cycle thermique, Corrosion chimique...

### **1.4.3 Le développement des matériaux composites :**

L'emploi du CND dans la recherche et l'amélioration des composites trouve un large éventail d'application, l'une d'elles consiste à nous informer sur le comportement d'un nouveau matériau lors des essais mécaniques, qui sont habituellement effectués pour la détermination de ses caractéristiques.

## **1.5 Les différentes méthodes utilisées pour le contrôle des composites :**

En effet il en existe diverses méthodes de contrôle non destructif (voir annexe) utilisées pour l'évaluation des composites, parmi elles on peut citer :

- *Radiographie X.*
- *Thermographie.*
- *Ultrasons.*
- *Les micro-ondes.*

- **Holographie - Moiré** : La présence d'un défaut ou d'un délaminage entraîne une large déformation de la surface du matériau. Ces deux méthodes sont des méthodes optiques avec lesquelles sont visualisées le déplacement, espacement de franges, d'interférences.
- **Fractographie** : Analyse des surfaces de rupture à posteriori.
- **Les courants de Foucault**.

Il existe beaucoup d'autres méthodes comme la potentiométrie, tomographie X...qui sont complémentaire entre elles, chaque méthode est utilisée pour des cas précis, une combinaison de plusieurs d'entre elles est parfois nécessaire pour avoir un bon diagnostic.

**Tableau 1.1** : Les principaux défauts détectés par quelques techniques de CND :

Techniques de CND	Principaux défauts						
	Porosités	Délaminage	Vide	Inclusion	Fissure	Orientati on des fibres	Défaut s des fibres
Radiographie	B	D	B	A	A	A	B
Thermographie	B	B	-	B	-	C	C
Ultrasons	A	A	B	B	D	C	B
Micro-ondes	A	A	A	A	A	A	A
Holographie	B	A	C	B	D	D	-

A : bien détecté. B : partiellement détecté. C : mal détecté. D : non détecté.

### 1.5.1 Limites d'utilisation des techniques de CND :

Chaque méthode du CND est limitée dans son application à des matériaux ou à des cas particuliers, vu qu'elles sont conditionnées par les caractéristiques du matériau mis en jeu et de du principe de la méthode, le tableau suivant illustre les limites de chaque méthode vis à vis du contrôle du composite :

**Tableau 1.2 : limites d'utilisation de quelques méthodes du CND.**

<b>Techniques</b>	<b>1.5.1.1 Principales limites</b>
Radiographies X	L'orientation du défaut est critique.
Thermographie	Sensibilité aux effets ambiants (température, courants d'air...)
Ultrasons	L'orientation du défaut est critique. L'immersion dans l'eau ou l'utilisation d'un couplant ou d'un jet peut provoquer la détérioration du matériau composite.
Holographie	Mesure les effets de surface qui sont reliés aux défauts. Une technique de laboratoire.
Courants Foucault	Limité aux composites carbone/résine.
Tomographie rayon X	à Une technique de laboratoire. Doit être étalonnée pour connaître exactement la dimension des défauts détectés.

Le contrôle par ultrasons est le plus utilisé pour le contrôle des structures en composites, dont le principal inconvénient est emploi d'un couplant. Une nouvelle méthode de CND à vue le jour ces dernières années, le contrôle Non Destructif par micro-ondes, qui présente beaucoup de similarités avec les ultrasons. Elle a l'avantage de ne pas demander de couplant, et s'adapte bien pour le cas des matériaux diélectriques, comme c'est le cas de la majorité des composites, elle permet de détecter tous les types de défauts, et sa technologie est très maîtrisée. Le contrôle par micro-onde est un nouvel axe dans la recherche actuelle et il fera l'objet de cette étude.

## Chapitre 2

# Les micro-ondes

## 2.1 Définition :

Le terme micro-ondes désigne toutes les ondes électromagnétiques se propageant à une fréquence de 0.3 à 300 GHz, qui correspond dans le vide à des longueurs d'ondes s'étalant de 1m à 1mm, et une vitesse de  $2.997 \cdot 10^8$  m/s. Ils occupent dans le spectre électromagnétique la portion située entre les ondes radio et les rayons infrarouge (figure 2-1), pour des raisons pratiques cette plage de fréquences est partagée en bandes normalisées (voir annexe).

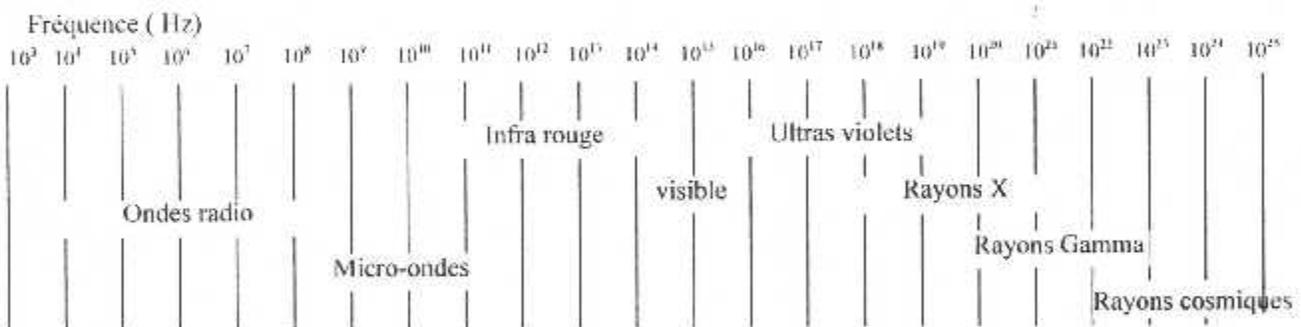


Figure 2-1: Spectre électromagnétique.

Cette région du spectre électromagnétique est la dernière à être explorée expérimentalement. On effet, ce n'est qu'en 1923 que les micro-ondes ont été générées et détectées pour la première fois. En 1930 les Américains et les Anglais ont découverts indépendamment que les avions refléter les ondes radio, le résultat fut le début des techniques de radar et l'utilisation des micro-ondes. Par la suite, leur technologie s'est développée et leurs applications multipliées (communication, télévision, four à micro-ondes, chauffage...)

## 2.2 Paramètres caractéristiques des matériaux :

Chaque matériau est caractérisé par un nombre de paramètres qui le différencie des autres matériaux, et décrivent sa réponse vis à vis du phénomène dont il est soumis, et par rapport aux phénomènes électromagnétiques on définit les paramètres suivants :

### 2.2.1 La conductivité électrique :

La conductivité électrique est une grandeur physique  $\sigma$ , caractérisant la capacité de conduction de courant électrique d'une substance, son unité dans le système international est l'ohm<sup>-1</sup>.mètre<sup>-1</sup>( $\Omega^{-1}m^{-1}$ ) ou siemens par mètre<sup>-1</sup> (S.m<sup>-1</sup>).

### 2.2.2 La perméabilité :

La perméabilité magnétique est une grandeur physique, qui caractérise la capacité d'une substance à acquérir une aimantation, son produit par le champ magnétique  $H$  est égale à l'induction magnétique  $B$  ( $\mu = B/H$ ), elle a comme unité le henry par mètre H.m<sup>-1</sup>.

### 2.2.3 La permittivité :

C'est une grandeur caractéristique du matériau diélectrique, elle est en relation directe avec la polarisation du matériau, elle a comme unité le farad par mètre F.m<sup>-1</sup>.

La polarisation est un terme qui désigne la direction du champ électrique, elle est provoquée par l'interaction des micro-ondes avec les matériaux diélectriques. Plusieurs mécanismes sont responsables de ce phénomène, à savoir, la polarisation électronique, la polarisation ionique ou atomique, la polarisation moléculaire (dipôle) et la polarisation d'espace charge. Bons nombres de paramètres l'influence, comme la variation de fréquence.

La contribution de chaque mécanisme détermine la polarisation totale du matériau, tel que :  $P = P_{\text{électron}} + P_{\text{atomique}} + P_{\text{moléculaire}} + P_{\text{espace charge}}$

La polarisation globale dans le matériau  $P$  crée un moment de dipôle qui augmente le déplacement total l'induction électrique  $D$  :

$$D = \epsilon_0 E + P$$

La polarisation peut être écrite en terme de successibilité électrique  $\chi$  :

$$P = \epsilon_0 \chi E$$

Ce qui implique que :  $D = \epsilon_0(1 + \chi)E = \epsilon_r \epsilon_0 E$ , Avec :  $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ .

La permittivité relative  $\epsilon_r$  est le rapport entre la permittivité naturelle du matériau et la permittivité du vide  $\epsilon_0$ , donc c'est la mesure directe de la polarisation du matériau régissant la variation de phase et l'atténuation du

champ imposé dans le matériau qui la détermine, ainsi la permittivité relative est une quantité complexe avec une partie imaginaire et une autre réelle, qui peut être écrit comme  $\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$ .

Sa partie réelle est appelée la constante diélectrique et elle est déterminée par la magnitude de la polarisation, elle détermine la quantité d'énergie électrostatique par unité de volume dans les matériaux.

Sa partie imaginaire est appelée le facteur de perte (atténuation), elle représente l'énergie perdue dans le matériau (sous forme de chaleur), c'est une atténuation du champ appliqué, elle est habituellement mesurée relativement à la constante diélectrique qui est appelé la tangente de perte, qui s'écrit de la manière suivante :  $\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$ .

Plusieurs paramètres influent sur la permittivité, la fréquence en fait partie. L'augmentation de celle-ci vers les fréquences radio, fait en sorte de réduire la constante diélectrique du matériau. Dans la bande des micro-ondes, la constante diélectrique reste sensiblement constante mais de forte magnitude.

L'augmentation de la fréquence vers la fin de la bande des micro-ondes et le début des ondes infrarouges, est suivie par l'augmentation de la constante diélectrique et la tangente de perte, mais dans les très hautes fréquences, la permittivité relative diminue.

#### 2.2.4 La profondeur de pénétration standard :

Elle est définie comme étant la profondeur pour laquelle le champ électrique initial diminue d'un facteur  $1/e$  ou de 36.8% de son intensité d'origine, elle est donnée par :  $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$  .....(2.48). Donc pour une fréquence donnée, l'onde électromagnétique pénètre dans le matériau avec une distance  $\delta$ .

#### 2.2.5 Les matériaux diélectriques :

Un diélectrique est un matériau isolant (papier, mica, verre, etc.) que l'on place le plus souvent entre les deux armatures d'un condensateur. Un diélectrique est constitué par un milieu matériel dans lequel un champ électrique peut exister à l'état stationnaire. Dans un tel corps, les électrons sont très fortement liés aux atomes et il n'existe pratiquement pas d'électrons libres ; c'est donc un très mauvais conducteur de l'électricité.

### 2.3 Equations de Maxwell :

Le physicien écossais J.C Maxwell fut le premier à expliquer la nature de tous les phénomènes électromagnétiques en terme seulement de 4 équations (connues sous le nom des équations de Maxwell). Il révéla pour la première fois, au monde entier que la lumière est une onde électromagnétique qui se propage à une fréquence perceptible pour l'œil humain.

Ces équations qui relient les phénomènes électriques aux phénomènes magnétiques démontrent l'existence théorique des ondes électromagnétiques, et décrivent la manière dont ces ondes se propagent. Elles sont comme suite :

- La variation dans le temps du champ magnétique engendre une variation spatiale du champ électrique :

$$\text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

- Les lignes de champ magnétique **B** ne convergent pas vers une destination, ni elles ont une source :

$$\text{div}B = 0 \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

- Les lignes de champ convergent ou divergent d'une source chargée électriquement selon son signe :

$$\text{div}E = \frac{\rho}{\epsilon} \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

- L'équation de continuité du courant électrique ou conservation de l'électricité, préconise que la densité de courant **J** sortant d'un volume entourant un milieu diélectrique avec pertes, n'est autre que la dimension de la charge pendant le même temps :

$$\text{rot}B = \mu \left( j + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

### 2.4 Equations d'ondes :

Les équations de Maxwell dans un milieu diélectrique homogène et en absence de charges et de courants ( $J=0, M=0, \nabla E = \nabla H = 0$ ) s'écrivent :

$$\begin{aligned} \nabla E &= -J\omega\mu I \\ \nabla H &= J\omega\epsilon E \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

Projeter sur le plan longitudinal et transverse ces expressions peuvent être décomposées tel que :

#### Equations longitudinales :

$$\begin{aligned} \nabla_z E_z &= -J\omega\epsilon_z H_z \\ \nabla_z H_z &= J\omega\epsilon_z E_z \end{aligned}$$

#### Equations transverses :

$$\begin{aligned} \nabla_z E_z - \frac{\partial E_z}{\partial z} &= -J\omega\epsilon_z H_z \\ \nabla_z H_z - \frac{\partial H_z}{\partial z} &= J\omega\epsilon_z E_z \end{aligned}$$

Ces équations décrivent le comportement des ondes électromagnétiques, dont la manière de propagation dépend, des caractéristiques physiques du milieu et des modes d'excitation. Ces modes sont obtenus en posant des conditions sur les composantes longitudinales ( $E_z$  et  $H_z$ ), ils sont indiqués sur le tableau suivant :

Mode	$H_z$	$E_z$
Transverse électrique et magnétique (TEM)	0	0
Transverse électrique (TE)	$\neq 0$	0
Transverse magnétique (TM)	0	$\neq 0$
Hybride	$\neq 0$	$\neq 0$

#### 2.4.1 Mode transverse électrique et magnétique (TEM) :

Pour ce mode les composantes des champs n'existent que dans le plan transverse, étant donné que :  $E_z = H_z = 0$ , ce mode de propagation est supporté par deux conducteurs comme dans une ligne de transmission ou, en espace libre dans la région lointaine de la source. Les équations transverses deviennent :

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_t}{\partial z} &= J\omega\mu\epsilon_z \cdot H_t \\ \frac{\partial H_t}{\partial z} &= -J\omega\epsilon_z \cdot E_t \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

On dérivant la première et on l'injectant dans la seconde, et posant :  $\beta^2 = \omega^2 \epsilon\mu$ , on trouve une équation d'onde du second ordre, décrivant le champ électrique transverse :

$$\frac{\partial^2 E_t}{\partial z^2} + \beta^2 E_t = 0 \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

De la même manière on obtient celle du champ magnétique transverse :

$$\frac{\partial^2 H_t}{\partial z^2} + \beta^2 H_t = 0 \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

Ces équations proposent l'existence d'une onde plane se propageant le long de l'axe Oz. Le terme  $\beta$  s'appelle le nombre d'onde ou la constante de propagation. Ces champs peuvent être exprimés avec la dépendance temporelle ( $e^{j\omega t}$ ) comme suite :

$$\begin{aligned} E_t &= e(x, y) \left[ A e^{j(\omega t - \beta z)} + B e^{j(\omega t + \beta z)} \right] \\ H_t &= -Z_g^{-1} e_z \cdot E_t \end{aligned} \quad \dots\dots(2.8)$$

avec :  $e(x, y)$  : Vecteur fonction modale.

On définit  $Z$  comme étant l'impédance de l'onde, du fait que  $\frac{E_t}{H_t}$  a la dimension de volt/Ampères, donc elle admet comme unité l'Ohms, elle est aussi :  $Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \dots (2.9)$

On a pour :  $Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$  une onde directe.  
 $Z = -\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$  une onde inverse.

Les caractéristiques d'une onde se propageant suivant le mode TEM :

- Les champs magnétique et électrique sont perpendiculaires, vu que leur produit est nul :  $E_t \cdot H_t = 0$ .
- La vitesse de phase :  $v_p = \frac{\partial Z}{\partial t} = \frac{\omega}{\beta}$ .
- La vitesse de groupe :  $v_g = \frac{\partial \omega}{\partial \beta}$ .
- La vitesse de propagation :  $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$ .
- Si le milieu est non magnétique ( $\mu = \mu_0$ ) la vitesse devient :  $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$ .
- La longueur d'onde est :  $\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$  ou  $\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_r}}$ .
- La polarisation de l'onde est définie par la direction du vecteur champ électrique en relation avec la direction de propagation, dans le cas où le champ électrique reste dans le même plan la polarisation est dite linéaire, elle peut être verticale ou horizontale.
- Le produit vectoriel  $S = E \wedge H$  ou vecteur de *Poyting* détermine le flux de puissance transportée par l'onde.
- Dans le cas où la conductivité du milieu est non nulle ( $\sigma \neq 0$ , diélectrique non parfait), la propagation est dite avec pertes. L'exposant de propagation  $j\beta$  est par conséquent remplacé par l'expression  $\gamma = \alpha + j\beta$  où  $\alpha$  est appelé affaiblissement linéique, comptant pour l'atténuation de puissance par unité de longueur, et  $\beta$  le coefficient de déphasage.

#### 2.4.2 Mode transverse électrique (TE):

Seul le champ électrique est renfermé dans plan transverse ( $E_z = 0$ ,  $H_z \neq 0$ ), ce mode peut être supporté par un seul conducteur creux appelé guide d'onde, les équations de Maxwell deviennent :

$$\begin{aligned}
 -\frac{\partial E_t}{\partial z} &= -j\omega\mu\epsilon_z H_t & \dots\dots\dots(2.10) \\
 \nabla_t H_z - \frac{\partial H_t}{\partial z} &= j\omega\epsilon_z E_t
 \end{aligned}$$

On manipulant ses deux équations on trouve l'équation du second ordre pour le champ magnétique :

$$\nabla_t^2 H_z + \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} + \omega^2 \epsilon\mu H_z = 0 \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

Celle-ci peut être décomposée en deux équations d'ondes, transverse et longitudinale :

$$\begin{cases}
 \nabla_t^2 H_z + \sigma^2 H_z = 0 \\
 \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} + \beta^2 H_z = 0
 \end{cases} \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

Avec :  $\sigma$  le nombre d'onde transverse et  $\beta$  le nombre d'onde longitudinale :

$$\sigma^2 = \omega^2 \epsilon\mu - \beta^2$$

Le champ magnétique transverse sans dépendance temporelle est :

$$H_t = e(x, y) [Ae^{-j\beta z} + Be^{j\beta z}] \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

La relation fondamentale pour une onde guidée est :  $\frac{1}{\lambda_g^2} = \frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}$

- $\lambda_0$  : La longueur d'onde libre.
- $\lambda_g$  : La longueur d'onde guidée.
- $\lambda_c$  : La longueur d'onde de coupure.

Elle correspond à la plus grande fréquence à partir de laquelle il y a propagation dans le guide. Généralement, se sont les valeurs propres de l'équation d'onde qui sont directement fonction des caractéristiques physiques du guide.

- La vitesse de propagation de groupe est :  $v_g = c \frac{\lambda_0}{\lambda_g}$
- La vitesse de propagation de phase est :  $v_p = c \frac{\lambda_g}{\lambda_0}$
- Le produit des vitesses est par conséquent :  $v_g v_p = c^2$
- L'impédance de l'onde est :  $Z_g = \frac{\omega\mu}{\beta}$

### 2.4.3 Mode transverse magnétique (TM) :

Seul le champ magnétique est pris en considération sur le plan transverse ( $E_z=0$  et  $H_z \neq 0$ ), ce mode aussi peut être supporté par le seul conducteur (guide d'onde), par analogie avec le mode TE, on retrouve les équations suivantes :

$$\nabla_t^2 E_z + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + \omega^2 \epsilon \mu E_z = 0 \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

Décomposée les équations deviennent :

$$\begin{cases} \nabla_t^2 E_z + \sigma^2 E_z = 0 \\ \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + \beta^2 E_z = 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

On ce qui concerne les longueurs d'ondes et les vitesses de propagation les même expressions s'appliquent. Mais l'impédance de l'onde est :  $Z_k = \frac{\beta}{\omega \epsilon}$  et le champ électrique transverse est :  $E_t = e(x, y) [Ae^{-j\beta z} + Be^{j\beta z}]$

## 2.5 Les supports d'ondes :

### 2.5.1 Les lignes de transmission :

Une ligne de transmission est un dispositif qui permet le transfert d'énergie hyperfréquence entre une source et une charge. Elle est constituée de deux conducteurs assurant une boucle pour le courant séparé par un diélectrique. Ce milieu favorise la propagation d'ondes électromagnétiques suivant le mode TEM.

La composante continue passe aussi puisque la fréquence de coupure basse est 0Hz. Sa longueur physique est généralement comparable à la longueur d'onde du signal de travail.

### 2.5.2 Guide d'onde :

Un guide est une structure métallique creuse, employée comme support de transmission. Les fréquences pratiques d'utilisation commencent à partir de 2GHz. Le guidage de l'onde se fait par réflexion multiple sur les surfaces conductrices de la structure creuse. L'avantage par rapport aux lignes de transmission, c'est qu'ils causent moins de pertes et peuvent transporter plus de puissance. Cependant la fréquence de coupure n'est pas 0Hz.

Les parois métalliques internes doivent être lisses, et d'une conductivité assez élevée pour jouer le rôle de miroir (ex. cuivre  $\sigma=5.8 \cdot 10^7$  s/m). L'épaisseur minimale métallisée doit correspondre à au moins  $5\delta$ .

La désignation des guides d'ondes repose sur les paramètres principaux suivants :

- Les dimensions internes fixes donnent les bandes de fréquences RADAR (X, L...).
- Les guides peuvent être rigides ou flexibles, faits en métal ou en plastique à parois internes métallisées.
- Plus important, la forme de la section transversale du guide peut être rectangulaire, circulaire ou autre.

### 2.5.2.1 Les guides rectangulaires :

De forme rectangulaire, la section transverse du guide est telle que montrer sur la figure ci contre :

Du fait qu'il n'y a qu'un seul conducteur, la propagation des ondes est soit suivant les modes TE, soit suivant les modes TM (voir annexe).

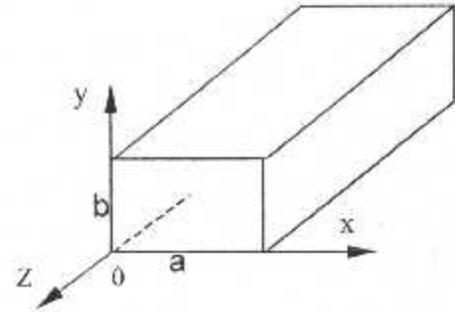


Figure 2-2: Guide d'onde rectangulaire.

- **Le mode TE :**

On a trouvé que la composante transverse de l'équation de l'onde pour ce mode est :  $\nabla_t^2 H_z + \sigma^2 H_z = 0$  .....(2.17)

Les conditions aux limites sur les parois internes du guide :

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial x} = 0 & \text{sur } x=0, a \\ \frac{\partial H_z}{\partial y} = 0 & \text{sur } y=0, b \end{cases} \dots\dots\dots(2.18)$$

Les nombres d'ondes transverses obtenues par les solutions des équations différentielles ont la forme :

$$\sigma^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \dots\dots\dots(2.19)$$

Sachant que :  $\lambda_c = \frac{2\pi}{\sigma}$  .....(2.20)

On a donc, les longueurs de coupure des modes TE<sub>mn</sub> qui sont :

$$\lambda_{c,mn} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \dots\dots\dots(2.21)$$

Ecrit en fonction de la longueur d'onde libre :  $\lambda_0 = \frac{c}{f}$  .....(2.22)

On obtient :  $\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}}$  .....(2.23)

Par conséquent, la relation de dispersion est :  $\omega = \frac{\beta c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}}$  .....(2.24)

L'impédance caractéristique en  $\Omega$  est :  $Z_0 = 377 \frac{\lambda_g}{\lambda_0}$  .....(2.25)

**le mode TE<sub>10</sub> :**

Pour le cas de guide rectangulaire, ce mode (m=1, n=0) correspond à la fréquence la plus basse qui peut se propager avec un minimum d'atténuation, il est le mode dominant. La longueur d'onde et les dimensions du guide sont liées par l'expression  $\lambda=2a$  et généralement  $b=a/2$ .

La bande passante d guide est définie comme étant la bande de fréquences s'étalant entre la fréquence de coupure du mode TE<sub>10</sub> et celle du TE<sub>20</sub> :  $f_{c10} < f < f_{c20}$

L'intensité du champ électrique suivant l'axe oy est donnée pour une puissance P par :

$$|E_x| = \sqrt{4Z_0 \frac{P}{ab}} \sin \frac{\pi x}{a} \quad \dots(2.26)$$

La puissance maximale transportable dans un guide remplis d'air (a,b en cm), avec E<sub>max</sub> (V/cm) correspondant au champ électrique maximum en V/cm permmissible sur le plan médian, suivant le mode dominant TE<sub>10</sub> est :

$$P_{(w)} = 6.63 \times 10^{-4} E_{\max}^2 ab \frac{\lambda}{\lambda_g} \quad \dots(2.27)$$

A remarquer que le champ de claquage de l'air est 30kV/cm.

• **Le mode TM :**

les conditions aux limites sont :

$$\begin{cases} E_z = 0 & \text{sur } x = 0, a \\ E_z = 0 & \text{sur } y = 0, b \end{cases} \quad \dots(2.28)$$

De la même manière que pour le mode TE on obtient les formules des différents paramètres, seulement l'impédance est :  $Z_0 = 377 \frac{\lambda_0}{\lambda_g}$  .....(2.29)

**Méthodes d'excitation des modes :**

La génération des différents modes dans un guide se fait à l'aide de sonde, antenne ou boucle. Le nombre ainsi que la position dépend du mode à exciter. Comme exemple, la figure ci-dessous montre l'excitation du mode fondamental TE<sub>10</sub> à l'aide d'une sonde.

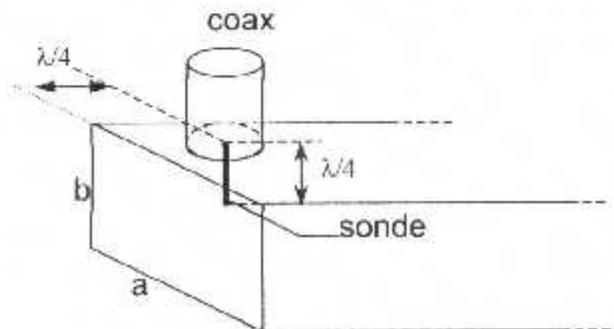


Figure 2-3 : Méthode d'excitation des guides.

## 2.6 Transmission et réflexion d'une onde électromagnétique :

Les micro-ondes se comportent de façon similaire aux ondes de lumière lorsqu'elles rencontrent un obstacle. Elles sont en partie transmises dans cet obstacle et en partie réfléchies sur sa surface.

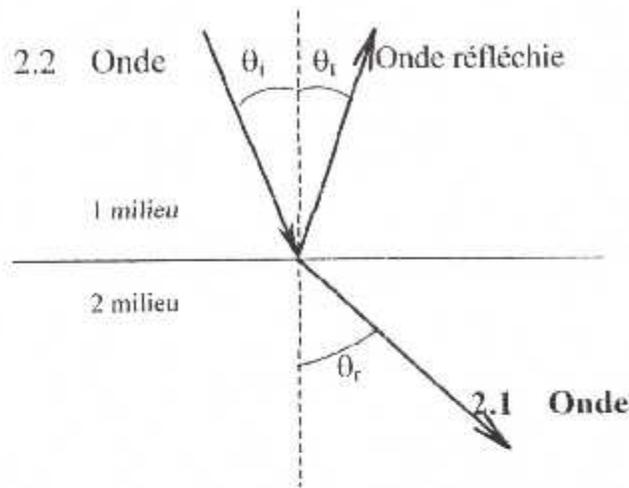


Figure 2- 4: Transmission et réflexion d'une onde.

L'onde incidente sur le premier milieu avec un angle  $\theta_i$ , va être transmise dans celui ci avec un autre angle, appelé angle de transmission  $\theta_t$  et de même réfléchie avec un angle de réflexion  $\theta_r$ .

Les équations établies par Snell décrivent les relations entre c'est différents angles :

$$\frac{V_i}{\sin \theta_i} = \frac{V_t}{\sin \theta_t} = \frac{V_r}{\sin \theta_r} \dots\dots\dots(2.30)$$

Autrement :  $\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{v_i}{v_t} \dots\dots\dots(2.31)$

Et  $\frac{\sin \theta_r}{\sin \theta_i} = \frac{v_i}{v_r} \dots\dots\dots(2.32)$

**L'indice de réfraction « n » :** C'est le facteur pour le quel l'onde est ralentie en entrant dans un milieu, paramètres caractéristique de chaque type de matériau, il s'écrit en fonction de la permittivité  $n = \sqrt{\epsilon_r} \dots\dots(2.33)$ . La vitesse

de propagation dans le milieu devient  $v = \frac{c}{n} \dots\dots(2.34)$ , la longueur d'onde de

même diminue comme :  $\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \dots\dots(2.35)$ .

Les équations deviennent :  $\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{n_1}{n_2}$  et  $\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{n_1}{n_2}$  .....(2.36)

Les équations de continuité des champs électrique et magnétique et donner par :

$$\begin{cases} E^r + E^t = E^i \\ H^r + H^t = H^i \end{cases} \quad \dots(2.37)$$

L'impédance intrinsèque  $Z_1$  du premier milieu peut être définie en terme de champ électrique et champ magnétique pour l'onde réfléchi ou pour l'onde incidente puisqu'elles se propagent dans le même milieu :

$$Z_1 = \frac{E^r}{H^r} = \frac{E^i}{H^i} \quad \dots(2.38)$$

- L'impédance de l'onde réfléchi est notée négativement puisqu'elle se propage dans le sens inverse à la propagation de l'onde incidente.

L'impédance intrinsèque  $Z_2$  du deuxième milieu :  $Z_2 = \frac{E_2}{H_2}$ .

- Le coefficient de réflexion est alors donner par :  $R = \frac{E^r}{E^i} = \frac{H^r}{H^i}$  .....(2.39)

En fonction des impédances :  $R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$  ....(2.40)

En fonction des coefficients de réfraction :  $R = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}$  ....(2.41)

- Le coefficient de transmission est donner par :  $T = \frac{E^t}{E^i} = \frac{H^t}{H^i}$  ....(2.42)

En fonction des impédances :  $T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$  ....(2.44)

En fonction des coefficients de réfraction :  $T = \frac{2n_2}{n_2 + n_1}$  ....(2.44)

En fonction des coefficients de réflexion :  $T = 1 + R$  ....(2.45)

- L'expression du coefficient de transmission inverse qui caractérise le passage inverse du milieu 2 vers le milieu 1 est donne par :  $T_i = 1 - R$ .

- On terme d'énergie ces coefficients devient :

$$T' = \frac{4Z_2^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad \text{et} \quad R' = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

- Aussi ils peuvent être mis en fonction du rapport des impédances :

$$T = \frac{4r^2}{(r+1)^2} \quad \text{et} \quad R = \frac{(r-1)^2}{(r+1)^2}$$

## Chapitre 3

# Le contrôle par micro-ondes

### 3.1 Principe de contrôle par micro-onde :

L'interaction des micro-ondes avec les matériaux est définie par l'énergie électrique et magnétique emmagasinée et dissipée, en terme de polarisation, de magnétisation et de conduction. Les micro-ondes sont totalement réfléchies à la surface des matériaux conducteurs, permettant ainsi l'étude de leur surface externe.

Par contre, les micro-ondes sont partialement réfléchies et transmises dans les matériaux diélectriques comme les plastiques, les céramiques et les matières organiques. Cette interaction ne permet pas seulement la mesure d'épaisseur, de dimension, mais aussi le contrôle non destructif de l'intérieur du matériau, la détermination de ses caractéristiques et la détection d'anomalies.

Une onde électromagnétique se propageant dans un milieu diélectrique ne subie de réflexion et de transmission partielle, que si elle rencontre une variation d'impédance. D'autre part, chaque matériau est caractérisé par une impédance propre à lui. Dans ce cas-là l'onde électromagnétique est autant réfléchié qu'il existe de changement de milieu. Sa vitesse de propagation et son amplitude varient aussi avec le changement de milieu.

Une onde émise dans la direction d'une pièce à contrôler saine ne subi que deux réflexions, une au début de la pièce et une autre à la fin de la pièce, qui correspond aux deux discontinuités majeures d'impédance. La présence d'une anomalie dans la matière va générer une ou plusieurs autres ondes réfléchies en plus des deux principales.

La courbe de signale réfléchié ou transmis, obtenu sur le matériau, va être modifiée de celle obtenue sans anomalie. L'analyse de cette courbe va permettre de détecter les discontinuités dans le milieu, et de le caractériser. Cela se fait en comparant son allure avec d'autre obtenu sur une pièce saine, ou en terme de coefficient de réfraction, qui permet de tirer les paramètres caractéristiques du milieu.

### 3.2 Mode de mesure :

On définit plusieurs modes de mesure qui sont fonction du type d'onde mis en jeu dans le contrôle :

#### 3.2.1 Par l'onde transmise :

On utilise deux éléments différents pour l'émission et la réception sur deux cotés du spécimen. La présence d'une anomalie dans le matériau provoque une atténuation plus prononcée de l'onde incidente, donc une onde transmise plus faible. A travers ça, on peut détecter d'éventuelle présence de défauts.

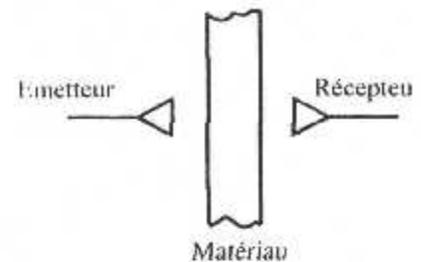
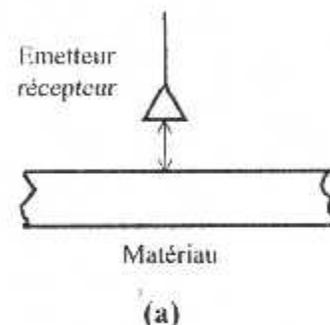


Figure 3.1 : Mode de mesure par onde transmise.

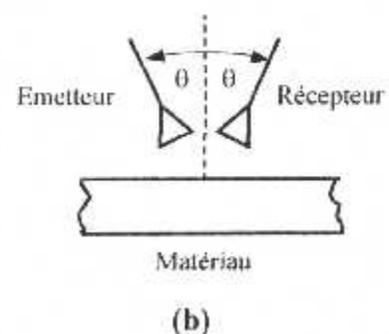
#### 3.2.2 Par l'onde réfléchie :

Pour ce type de contrôle, on peut utiliser un seul élément pour l'émission de l'onde et pour sa réception, ou deux éléments distincts. Il en existe plusieurs configurations, qui sont fonction du type de défaut recherché. L'utilisation d'un seul élément pour les deux fonctions permet de réduire l'encombrement et facilite l'accès aux zones à contrôler. En effet, il ne nécessite qu'une seule face de la pièce pour le contrôle.



Par contre, l'utilisation de deux éléments pour la mesure, évite la superposition du signal émis et les différentes réflexions dues aux milieux de propagation (Figure 3.2-b et c), et permet accéder à des zones complexes.

Il faut savoir que les pièces réelles ne sont pas toutes parfaitement planes et de géométrie simple. Le fait de travailler avec un angle d'incidence près défini, permet d'atteindre les défauts cachés ou les défauts dont l'orientation n'est pas parallèle à la surface, comme c'est le cas des cordants de soudure.



On outre, il est possible de contrôler l'état de surface d'un matériau conducteur par l'analyse des échos réfléchis, qui peuvent être modifiés par la présence de défaut, de corrosion ou d'autres anomalies.

Figure 3.2 : Différents modes de mesure par onde réfléchie

### 3.3 La chaîne de mesure :

Les circuits utilisant les micro-ondes sont de nature peu commune par rapport aux circuits électroniques classiques. Les composants électroniques d'un tel circuit sont dit, distribuifs, est ressemblé de beaucoup aux circuits optiques. Une chaîne de mesure par micro-ondes

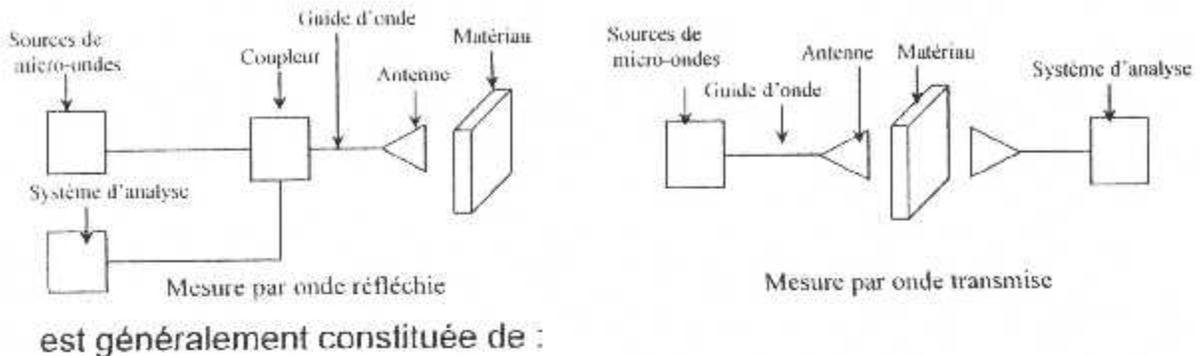


Figure 3.3 : Schémas synoptiques des modes de mesure.

#### 3.3.1 Le générateur de micro-ondes :

Il génère les micro-ondes avec la puissance nécessaire au contrôle. Il englobe aussi d'autres éléments tel que l'amplificateur, le fréquencemètre, l'atténuateur, les filtres, le mixeur...

#### 3.3.2 Les supports d'ondes :

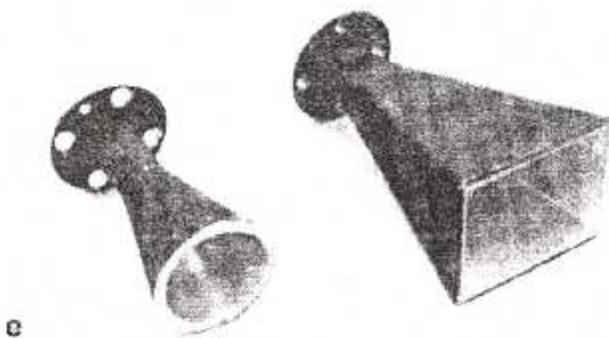
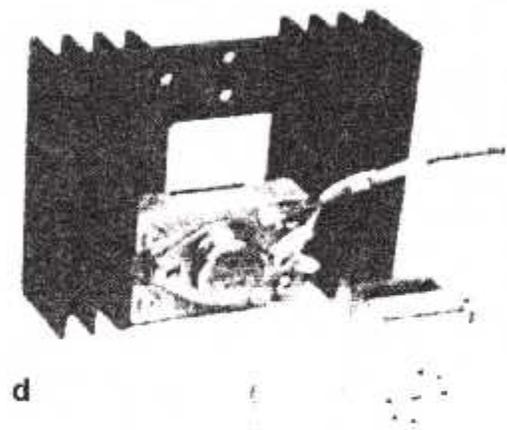
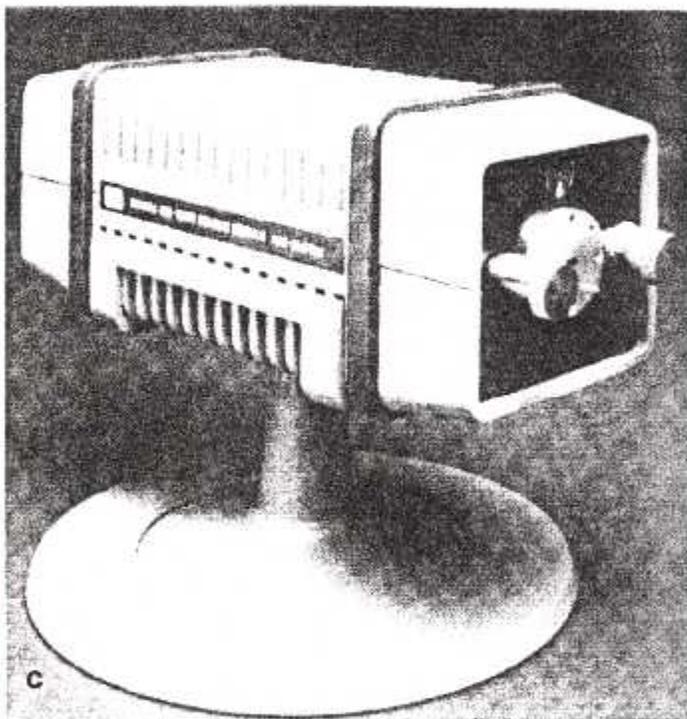
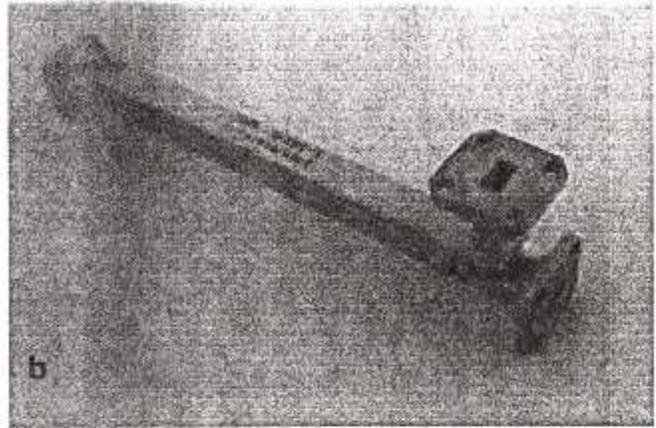
Ils ont le rôle d'acheminer l'onde vers sa destination. Il en existe deux sortes, les câbles coaxiaux ou les guides d'onde<sup>[9]</sup>. Ces derniers se présentent sous plusieurs formes, comme ils peuvent être rigides ou flexibles.

#### 3.3.3 Les antennes :

Typiquement utilisée pour le Contrôle Non Destructif, elle consiste en des cors d'ouvertures de forme circulaire ou carrée, se trouvant en fin de guide. Le gain est déterminé par sa géométrie. Généralement, plus la fréquence est grande, plus l'antenne est petite.

#### 3.3.4 Système d'analyse :

Les mesures obtenues lors du contrôle sont traitées immédiatement, affichées sur un écran d'oscilloscope ou stockées par un enregistreur pour une exploitation ultérieure.



**Figure 3-4 :** Eléments constitutifs d'une chaîne de mesure.

- a) Guide d'onde rigide.
- b) Guide d'onde flexible.
- c) Sources de micro-ondes multi-fréquences.
- d) Source de micro-onde simple fréquence.
- e) Antennes.

### **3.4 Domaine d'utilisation du contrôle par micro-ondes :**

Le contrôle par micro-ondes trouve plusieurs applications dans l'examen et la caractérisation des matériaux, donc il est utilisé pour :

#### **3.4.1 Détection d'anomalie :**

Les micro-ondes permettent la détection de toute variation dans la structure du matériau. La présence de fissure, discontinuités, anomalies modifie de beaucoup le signal des micro-ondes, ce qui abouti à leur localisation.

#### **3.4.2 Mesure des propriétés des matériaux :**

L'habilité de mesurer ou de détecter la variation dans la constante diélectrique et dans le facteur de perte, à permis la corrélation pratique de quelques propriétés des matériaux. Les micro-ondes on permis de détecter la composition, l'homogénéité, la dureté, la densité, la structure (degré de cuisson, changement de phase) et l'isotropie et l'anisotropie des matériaux.

#### **3.4.3 Mesure d'épaisseur :**

La méthode des micro-ondes peut mesurer l'épaisseur des matériaux diélectriques, à condition que les surfaces soit parallèles et que leurs propriétés diélectriques soit constants.

#### **3.4.4 Application des micro-ondes sur les métaux :**

On vertu de la haute conductivité des métaux, l'application des micro-ondes est réduite à l'examen de leur surfaces externes et la topographie. Ils offrent aussi la possibilité de mesurer les épaisseurs, et la détection de criques de surfaces.

#### **3.4.5 Mesure d'humidité :**

La mesure d'humidité revient à mesurer la quantité d'eau dans un solide. Etant donné que les micro-ondes réagissent fortement avec les molécules d'eau, ils permettent d'effectuer cette mesure, dans plusieurs types de matières ou même dans le sol. Il est utilisé pour cette fonction dans l'industrie chimique, plastique, l'agriculture, l'industrie du papier, du bois et des textiles, etc.

#### **3.4.6 Imagerie médicale :**

Le contrôle par micro-ondes est utilisé dans le secteur médical, pour donner un diagnostique de l'état de la tumeur, sa taille, son type et la mesure de sa température. Il évitant un nombre important d'examen traumatisant supplémentaire et diminuant les coûts d'investigation.

### 3.4.7 Autres applications :

- **Mesure et détection des vibrations** : Ils offrent une méthode alternative pour la surveillance du comportement des objets soumis à des vibrations.
- **Mesure de vitesse** : Les micro-ondes sont communément utilisées pour la mesure de vitesse d'objets réfléchissants par rapport à un capteur fixe. La fréquence des micro-ondes réfléchies varie proportionnellement à la vitesse de déplacement des objets. Elle diminue si l'objet s'éloigne du capteur, et augmente dans le cas contraire. Le radar de police travail avec ce principe.
- **Application des micro-ondes dans l'archéologie** : Certains systèmes à micro-ondes ont trouvés des applications pour des examens non destructifs des sites archéologiques.

### 3.4.8 Précision

La précision de la mesure est fonction de la longueur d'onde utilisée, donc elle dépend du choix de la fréquence de travail. Plus la longueur d'onde augmente plus la fréquence diminue et avec elle la précision. La meilleure précision obtenue avec les micro-ondes est pour la plus haute fréquence (300Ghz) correspondante à une longueur d'onde de 1mm. Avec cette fréquence on peut détecter des défauts de l'ordre de 0.1mm.

## 3.5 Modélisation de la propagation de micro-ondes dans les matériaux :

### 3.5.1 Définition de la modélisation :

On désigne par modèle, un ensemble de phénomènes élémentaires simples structurés qui définissent un phénomène complexe. Il peut être :

- **Mathématique** : C'est mettre sous forme d'équations le phénomène étudié, et d'essayer de trouver la solution aux problèmes rencontrés analytiquement.
- **Numérique** : Se reposant sur les modèles mathématiques, le modèle numérique met sous forme d'algorithmes de calcul, les résultats obtenus par théorie. Il permet d'aller plus en profondeur dans la résolution des phénomènes réels, qui sont de nature complexe très difficiles à calculer analytiquement.
- **Expérimental** : Il permet de concevoir des relations simples qui déterminent le phénomène étudié à partir des expériences.
- **Empirique** : Basé d'un coté sur la théorie mathématique est d'un autre coté sur l'expérience.

Suivant la complexité du problème traité, on a recourt à un type de modèle ou à un autre. Actuellement, la tendance est pour les modèles

numériques, que le développement technologique en matière d'informatique à contribuer à son expansion.

Toute fois, il est nécessaire de valider les résultats obtenus par le modèle numérique, par des résultats expérimentaux, qui permettent d'estimer les erreurs commises, et s'il est possible de perfectionner le modèle. Notre choix s'est porté sur ce type de modèle, qui s'adapte bien pour le cas étudié.

### 3.5.2 La propagation de micro-ondes dans les matériaux :

Les matériaux composites sont élaborés sous forme de plusieurs couches (stratifié, sandwich...). Chaque couche présente une impédance différente. L'onde électromagnétique incidente sur ce matériau, est la superposition de l'onde directe ou transmise  $U_t$  (se propageant dans le sens des  $z$  positifs) et de l'onde inverse ou réfléchie  $U_r$  (qui se propage en sens inverse), qui subissent de multitude de réflexions et de transmissions.

Cette étude sera portée sur les ondes réfléchies qui sont recueillies par le récepteur. Elle repose sur deux éléments de mesure pour l'émission et la réception. Ce qui offrent l'avantage de tester le matériau que d'un seul côté, chose qui est pratique pour le travail en terrain, comme il permet de ne pas avoir l'interférence de l'onde excitatrice. Donc le signal recueilli en surface n'est que le signal réfléchi par le matériau.

Les différentes couches sont caractérisées par des coefficients de réflexion  $\{R_1, R_2, R_3, \dots, R_n\}$  et des coefficients d'amortissement  $\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n\}$ . On représente deux segments  $S_{i-1}$  et  $S_i$  au temps  $t_{j-1}$  et  $t_j$  sur le schéma suivant :

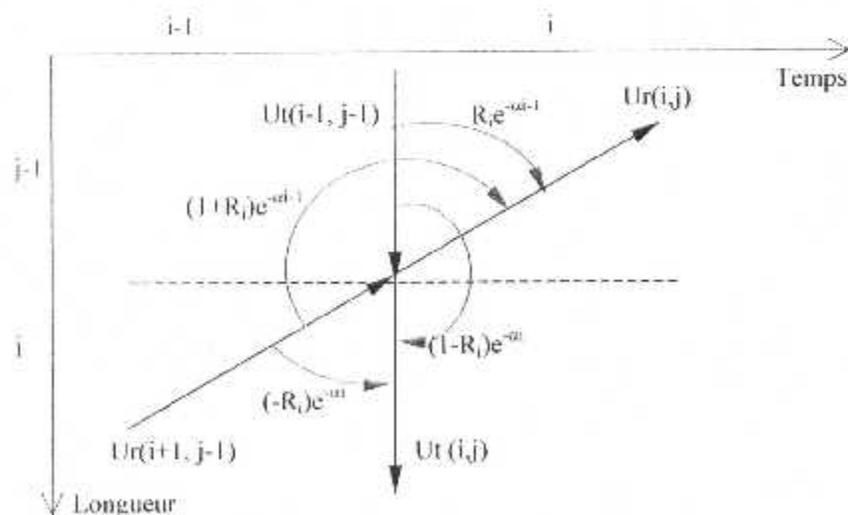


Figure 3-5: Représentation de deux segments élémentaires.

A partir des études faites sur la modélisation de la propagation des micro-ondes, les équations de propagation s'écrivent (voir annexe) :

$$\begin{cases} U_t(i, j) = (1 + R_1)e^{-\alpha} U_t(i-1, j-1) - R_1 e^{-\alpha} U_t(i+1, j-1) \\ U_r(i, j) = R_1 e^{-\alpha} U_r(i-1, j-1) + (1 - R_1)e^{-\alpha} U_t(i+1, j-1) \end{cases} \dots\dots\dots(3.1)$$

A l'intérieur du matériau, il se crée aussi une multitude d'ondes secondaires, issues des multitudes réflexions et transmissions que subissent les premières ondes réfléchies sur les diverses interfaces, elles sont de faibles amplitudes et peuvent être négligées. Les équations (3.1) deviennent :

$$\begin{cases} U_t(i, j) = (1 + R_1)e^{-\alpha} U_t(i-1, j-1) \\ U_r(i, j) = R_1 e^{-\alpha} U_r(i-1, j-1) \end{cases} \dots\dots\dots(3.2)$$

### 3.5.3 Modèle de simulation de courbe du signal réfléchi :

Le milieu de propagation à été modélisé en une succession de segments de différentes épaisseurs, chacun d'eux est caractérisé par son coefficient de réfraction  $n$ . Supposant que les milieux sont faiblement atténuateurs et l'amortissement négligeable ( $\alpha=0$ ). On obtient :

$$\begin{cases} U_t(i, j) = (1 + R_1)U_t(i-1, j-1) \\ U_r(i, j) = R_1 U_r(i-1, j-1) \end{cases} \dots\dots\dots(3.3)$$

En rencontrant le 1<sup>er</sup> milieu, l'onde incidente  $U_0$  se décompose en deux ondes. Elle donne naissance à la 1<sup>er</sup> onde transmise  $U_{t1}$  dans le 2<sup>eme</sup> milieu, d'indice de réfraction  $n_2$ . Et à la 1<sup>er</sup> onde réfléchie  $U_{r1}$  dans le 1<sup>er</sup> milieu, d'indice de réfraction  $n_1$  (qui est en faite de l'air).

- Le 1<sup>er</sup> coefficient de réflexion est donné à partir d'équation :  $R_1 = \frac{n_2 - n_1}{n_1 + n_2}$ .
- Les amplitudes des ondes transmises et réfléchies sont donner à partir des équations (3.2) :
 
$$U_{t1} = U_0(1 + R_1)$$

$$U_{r1} = U_0 R_1$$

L'onde transmise se propageant dans le 2<sup>eme</sup> milieu, va subir le même phénomène en rencontrant l'interface du 3<sup>eme</sup> milieu, elle va donc donner naissance à une onde transmise  $U_{t2}$  dans le 3<sup>eme</sup> milieu d'indice de réfraction  $n_3$  et une onde réfléchie  $U_{r2}$  dans le 2<sup>eme</sup> milieu, et de même pour la traversé des autres milieux.

- Le coefficient de réflexion :  $\frac{1}{2}$ .
 
$$R_2 = \frac{n_3 - n_2}{n_2 + n_3}$$

- Les amplitudes :

$$U_{t_2} = U_{t_1} T_3 = U_0 (1 + R_1)(1 + R_2)$$

$$U_{r_2} = U_{t_2} R_2 (1 - R_1)(1 - R_2)$$

On considère le cas de la 2<sup>ème</sup> onde transmise  $U_{r_2}$ . Elle se propage dans le 3<sup>ème</sup> milieu, et va être transmise dans le 2<sup>ème</sup> et dans le 1<sup>er</sup> milieu, et réfléchi dans le 3<sup>ème</sup> et dans le 2<sup>ème</sup> milieu respectivement (Elle a tendance de remonter vers la surface) ou, elle va être recueillie au niveau de l'élément de mesure. Il est de même pour toutes les premières ondes réfléchis sur les interfaces des différents milieux. On obtient alors, pour chaque interface une onde réfléchi correspondante. De manière générale on peut écrire :

- Les coefficients de réflexion :

$$R(i) = \frac{n(i+1) - n(i)}{n(i+1) + n(i)}$$

- Les amplitudes des ondes sont données par :

$$\begin{cases} U_t(i) = U_0 \prod_{j=1}^i (1 + R(j)) \\ U_r(i) = R_i U_t(i) \prod_{j=1}^i (1 - R_j(j)) \end{cases}$$

Ces équations sont misent en fonction des indices des segments, on obtient à ce moment un système qui s'adapte bien à des algorithmes de calculs numériques itératifs. Le schéma suivant illustre le phénomène :

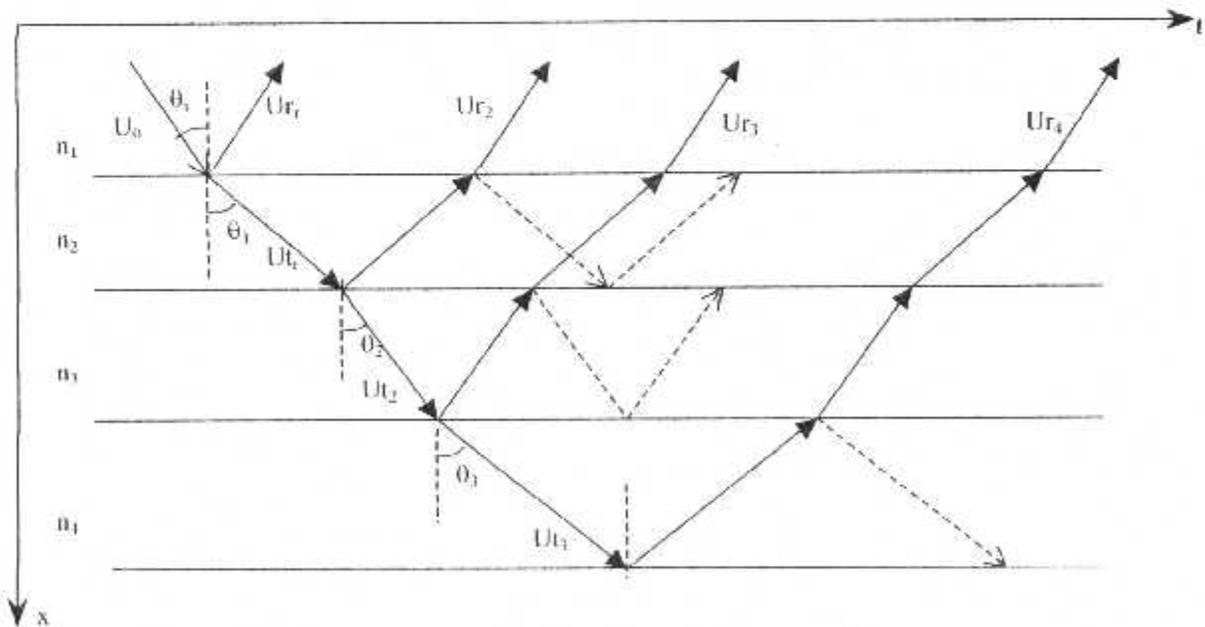


Figure 3-6: Propagation des micro-ondes dans le composite.

### 3.5.3.1 Les étapes de calcul :

On premier lieu, on calcule l'indice de réfraction caractéristique de chaque milieu à partir de leur constante diélectrique par la relation :  $n = \sqrt{\epsilon_r}$ . De là, le calcul des différents coefficients de réflexion, de transmission correspondants devient possible. A partir des équations précédentes, on trouve les amplitudes des ondes réfléchies et transmises.

Il reste à calculer le retard temporel de chaque onde réfléchie, extrait à partir des vitesses de propagation dans les différents milieux, on sachant les distance parcourues par l'onde. on a :

D'après l'équation (2.36), on a :

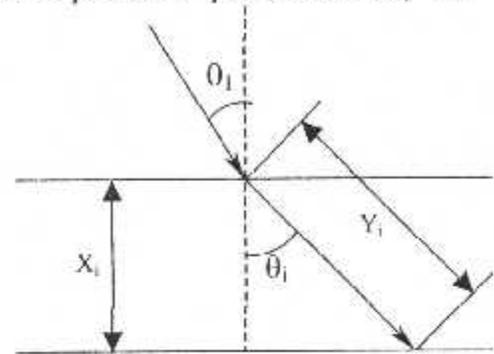


Figure 3-7:

$$\sin \theta_r = \frac{n_i}{n_r} \sin \theta_{i,r} \quad \text{donc : } \theta_r = \arcsin(\sin \theta_i)$$

La vitesse de propagation est donnée par :  $v_i = \frac{c}{n_i}$

Aussi :  $y_i = t_i v_i$  , il implique que :  $t_i = \frac{y_i}{v_i}$

Sachant que la distance parcourue est la distance par l'onde :  $y_i = \frac{x_i}{\cos \theta_i}$

alors:  $t_i = \frac{x_i}{v_i \cos \theta_i}$ , qui correspond au temps de traversé d'un seul milieu.

Le temps de retard de chaque onde est le temps d'aller et de retour, donc deux fois le temps de traversée. On obtenait les amplitudes des ondes réfléchies et le retard qui lui est correspondant, on représente le signal réfléchi.

### 3.5.4 Algorithme de calcul

Il est peut-être nécessaire maintenant, et avant de passer aux résultats concrets, de résumer les différentes étapes de calcul du modèle. Voici sur la figure suivante l'algorithme simplifié de ce dernier.

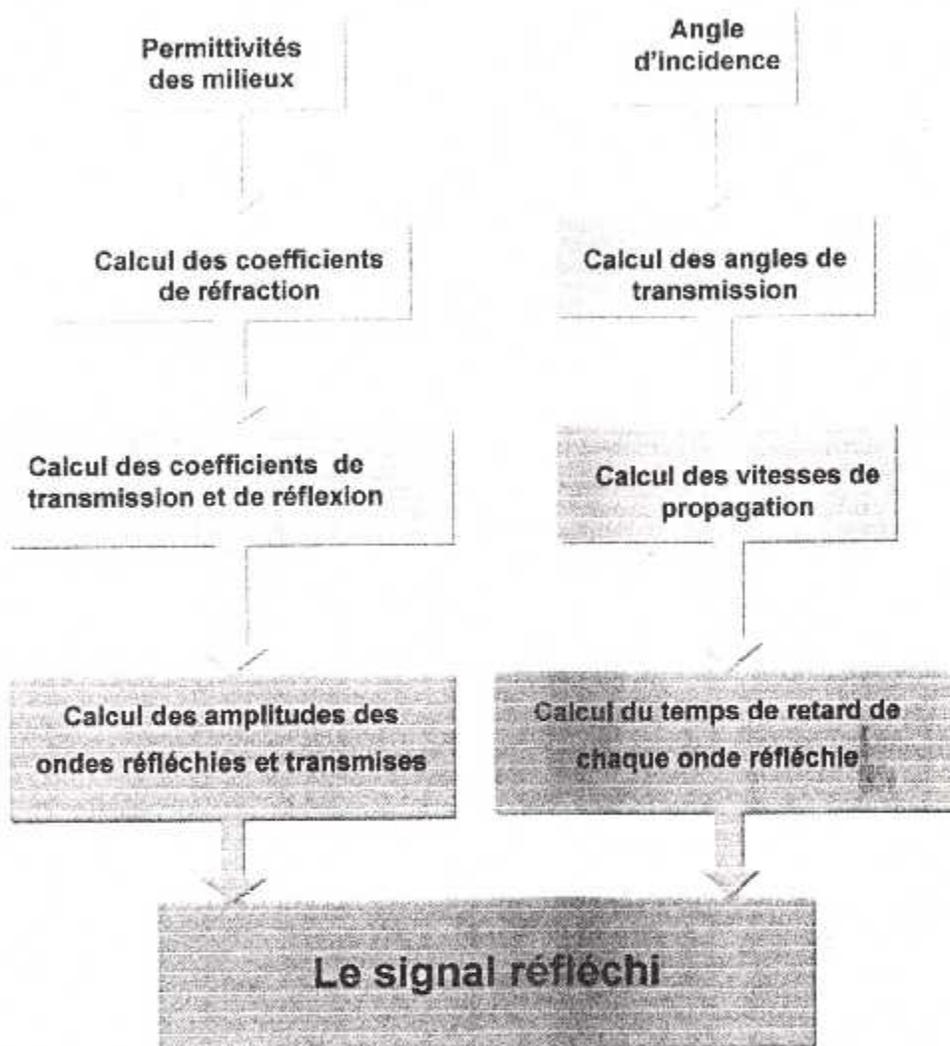


Figure 3-8: Algorithme de calcul.

**Remarque :** cet algorithme ne prend pas en considération les paramètres internes du générateur et des guides d'ondes, les caractéristiques de l'onde électromagnétique sont pris à la sortie des guides d'ondes.

## Chapitre 4

# Résultats de la simulation

#### 4.1 Simulation du contrôle des matériaux :

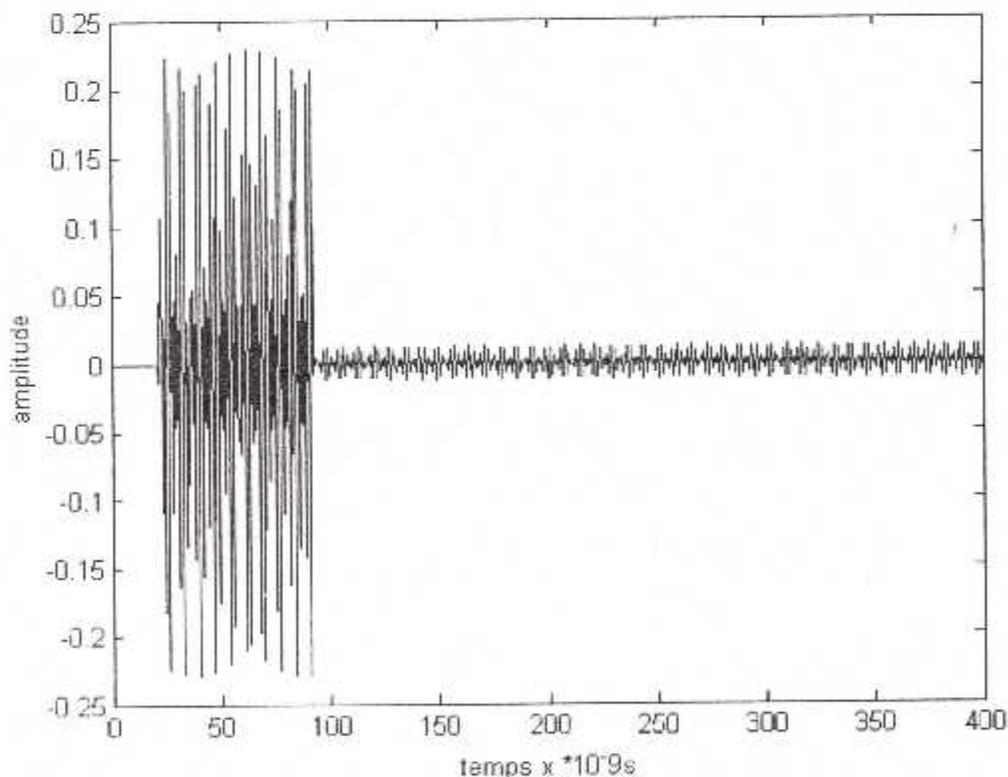
Le modèle simulé répond à plusieurs applications des micro-ondes dans le domaine du CND, à savoir la détection d'anomalies (fissures, inclusion de matière ou de l'air, etc.), et la mesure d'épaisseur.

#### 4.2 Mode opératoire :

Pour toutes les applications suivantes, le signal d'excitation est un signal sinusoïdal, d'amplitude égale à l'unité et d'une fréquence de 300 GHz. La permittivité relative de l'air est de l'ordre de 1. Une fissure est assimilée à une incursion d'air, avec tous ses caractéristiques.

##### 4.2.1 Cas d'un matériau classique :

Pour observer le type de signal résultant d'un seul changement de milieu, on procède au contrôle d'un matériau classique d'une permittivité relative de  $\epsilon_r=2.54$  et d'une épaisseur de 2 mm, On obtient le signal suivant :



**Figure 4-1 : Courbe du signale réfléchi d'un matériau classique.**

Le signal résultant présente deux zones d'amplitudes différentes. La première zone correspond à la propagation des micro-ondes dans le matériau, elle apparaît après un certain retard, qui définit la distance entre l'élément de mesure et le matériau. La seconde variation d'amplitude est due à l'écho de fond.

#### 4.2.2 Cas d'un composite :

Le spécimen est un stratifié constitué de trois plis unidirectionnels, dont l'orientation est quelconque. Il est fait d'une matrice de résine de 2mm d'épaisseur, et des fibres de verre d'une épaisseur de 0.5mm, avec un taux de renfort qui avoisine les 75%. Ces deux éléments possèdent les caractéristiques suivant :

- La résine N°90S:  $\nu_p = 2.54$
- La fibre de verre :  $\nu_p = 4.4$

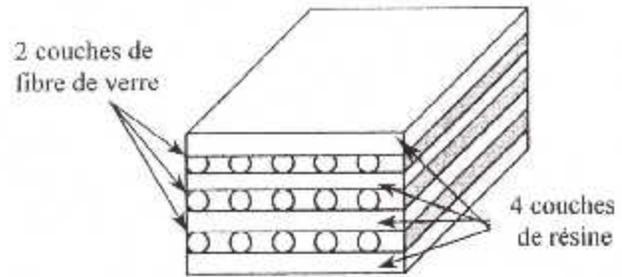


Figure 4-2: Matériau composite.

##### 4.2.2.1 Matériau sain :

Dans le cas d'un matériau sain, on obtient le signal suivant :

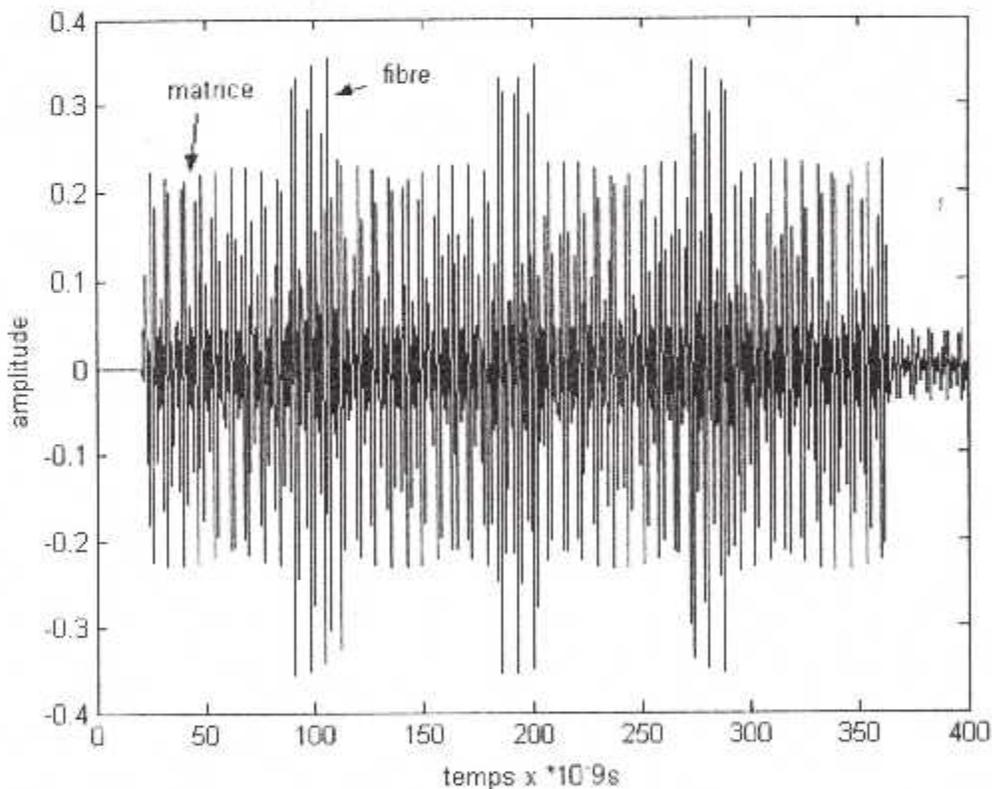


Figure 4-3 : Courbe du signal réfléchi pour un matériau composite sain.

On peut observer que la propagation des micro-ondes dans chaque couche du composite est représentée par un changement d'amplitude. On remarque aussi, que le temps de propagation diffère d'un milieu à un autre. Il est moins important dans les couches de fibre par rapport à celui observé sur la matrice, c'est en relation avec leurs épaisseurs.

#### 4.2.2.2 Fissuration de la matrice :

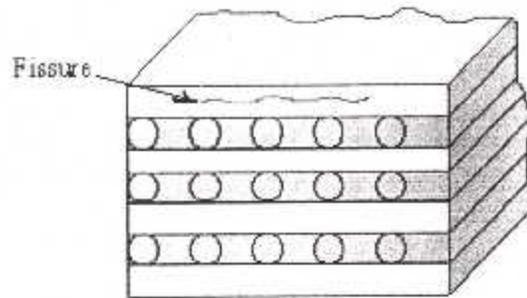


Figure 4-4: Fissuration de la matrice.

- Dans le cas d'une matrice intégrant une fissure de 0.5mm, le signal obtenu est de la forme suivante :

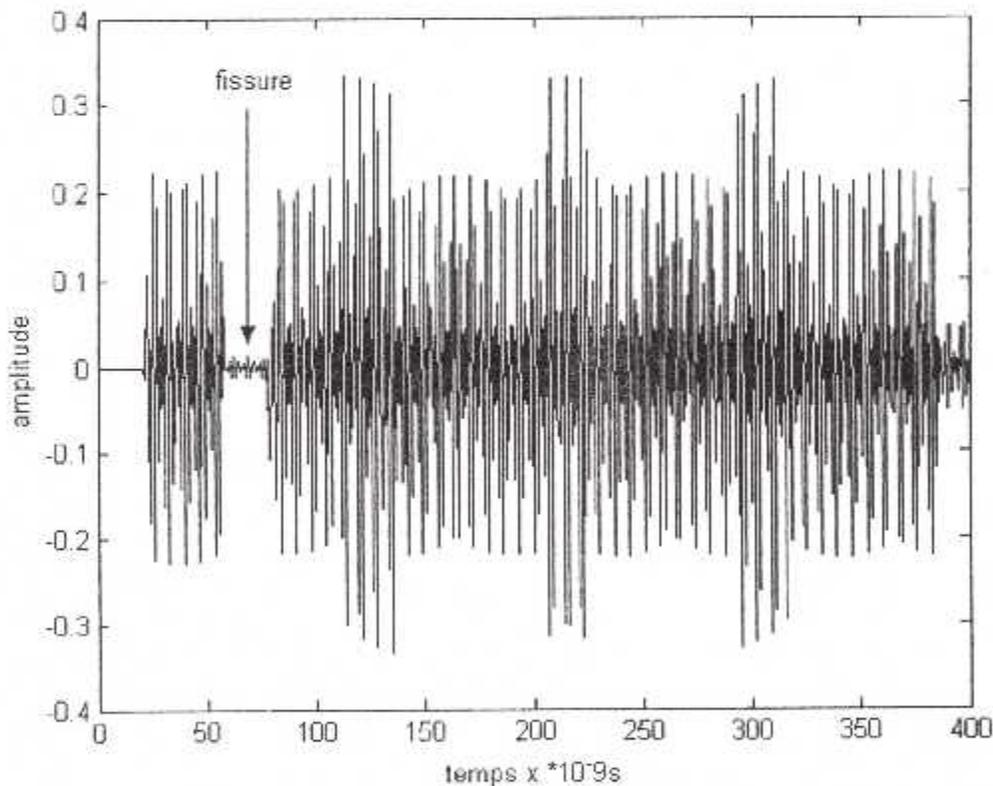


Figure 4-5: Courbe du signal réfléchi pour une matrice fissurée de 0.5 mm.

On constate sur la courbe, que la zone correspondante à la matrice fissurée, présente une variation brusque d'amplitude, cette variation est due à la présence de la fissure au milieu de la matrice. On remarque qu'une discontinuité dans la matière génère deux réflexions supplémentaires, qui modifient la courbe initiale et intègre une zone équivalente à un autre milieu (air). Le temps de propagation dans la fissure est relativement important, vu que l'épaisseur de la fissure est de même ordre que les dimensions de matrice

- On dimuniant la dimension de la fissure jusqu'à 0.1mm :

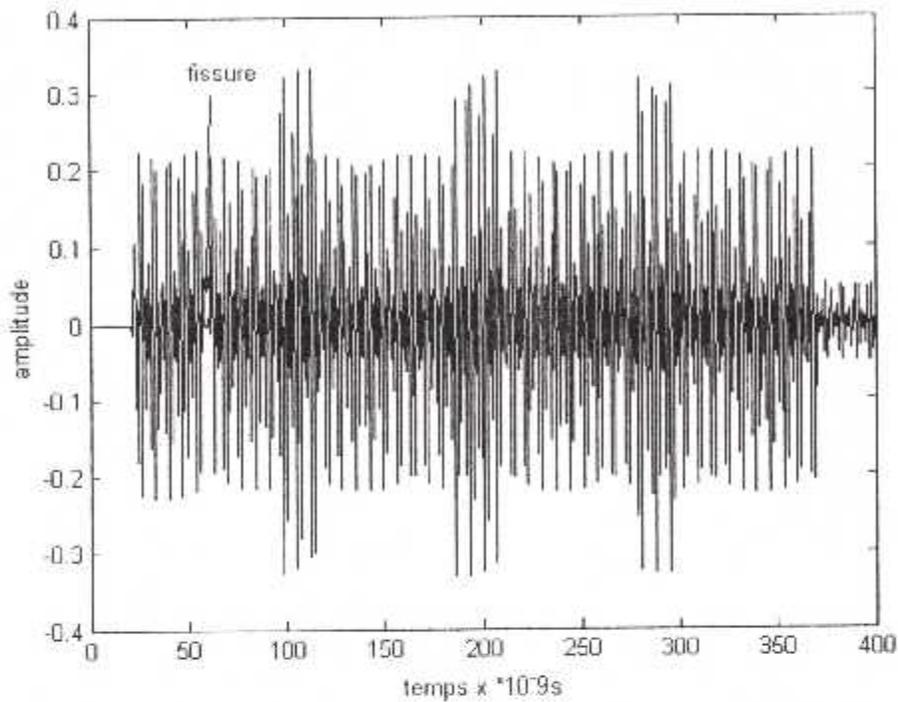


Figure 4-6: Courbe du signal réfléchi pour une matrice fissurée de 0.1mm.

La réduction de l'épaisseur de la fissure à réduit la zone de perturbation. On remarque que la diminution de dimension correspond à une diminution du temps de propagation.

- Dans le cas de la fissure de 0.1mm, située sur la 3<sup>eme</sup> matrice, on obtient :

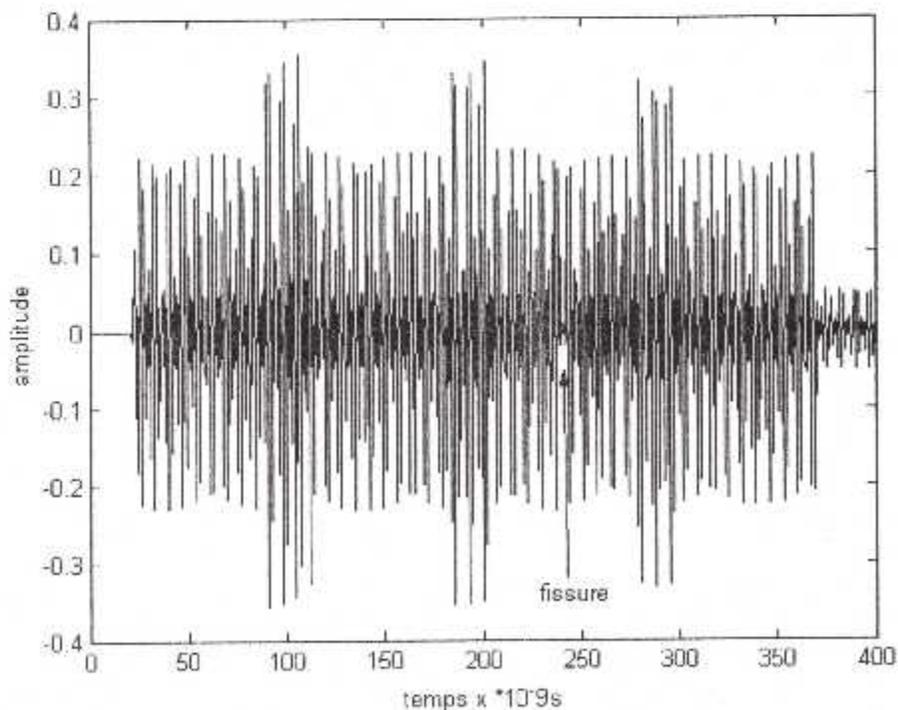


Figure 4-7 : Courbe du signal réfléchi pour une matrice fissurée de 0.1mm.

Sur cette courbe, on remarque le déplacement de la variation d'amplitude vers la zone de correspondante à la troisième matrice, là où on a intégré la fissure, la perturbation est de même ordre que pour la fissuration de la 1<sup>er</sup> matrice.

#### 4.2.2.3 Fissuration de la fibre :

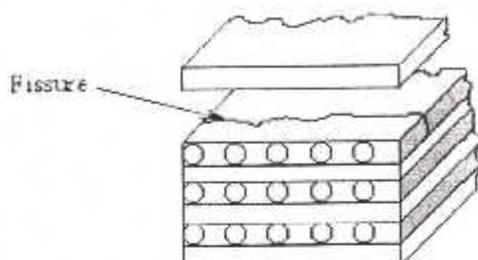


Figure 4-8 : Rupture de fibre.

- Dans le cas de la 1<sup>er</sup> couche de fibre, possédant une fissure de 0.5mm qui s'étale sur toute son épaisseur. On obtient la courbe suivante:

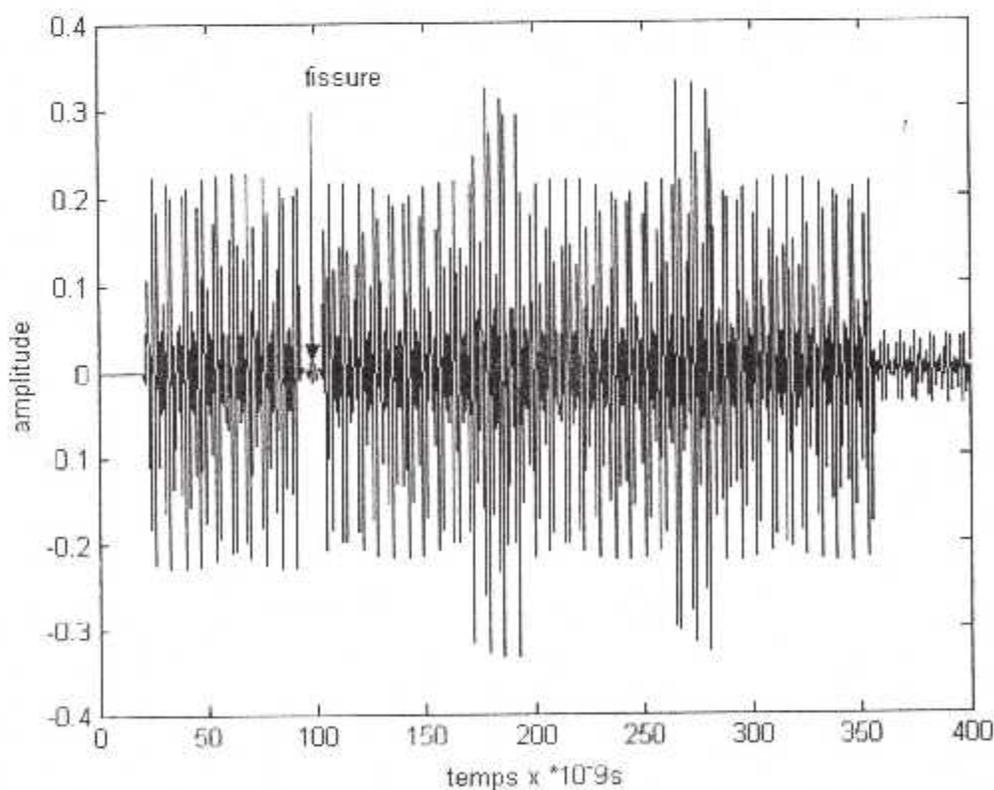


Figure 4-9: Courbe du signal réfléchi pour des fibres fissurées de 1mm.

Sur ce graphe on remarque un brusque changement, qui correspond à la zone représentative de la couche de fibre. Cette zone a disparue, étant donné que la fissure traverse toute l'épaisseur de la couche de fibre.

- La fissure est d'une épaisseur de 0.1mm, elle ne traverse pas toute l'épaisseur de la couche, on obtient :

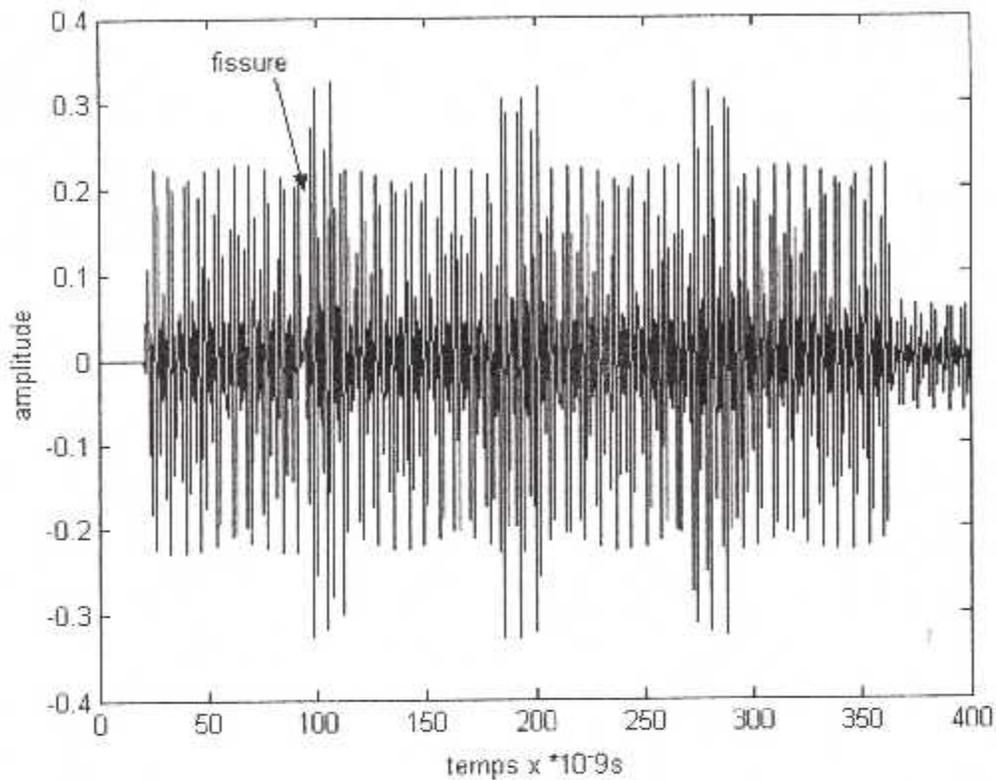


Figure 4-10 : Courbe du signal réfléchi pour des fibres fissurées de 0.1mm.

Sur cette courbe, il apparaît une diminution de zone de perturbation par rapport au graphe précédent, mais on conserve la partie représentative de la couche de fibre.

#### 4.2.2.4 Décollement des couches :

La rupture de l'interface fibre-matrice est assimilée à une incursion de entre les deux couches. La couche de fibre est d'une épaisseur de 0.2mm, située entre la 2<sup>ème</sup> couche de matrice est la 2<sup>ème</sup> couche de fibre. on obtient le signal suivant :

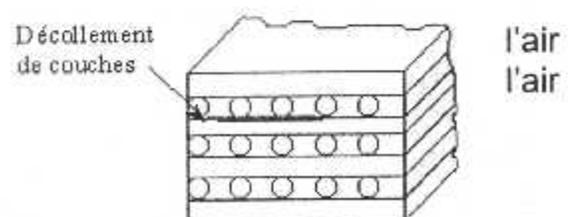


Figure 4-11: Décollement de couches.

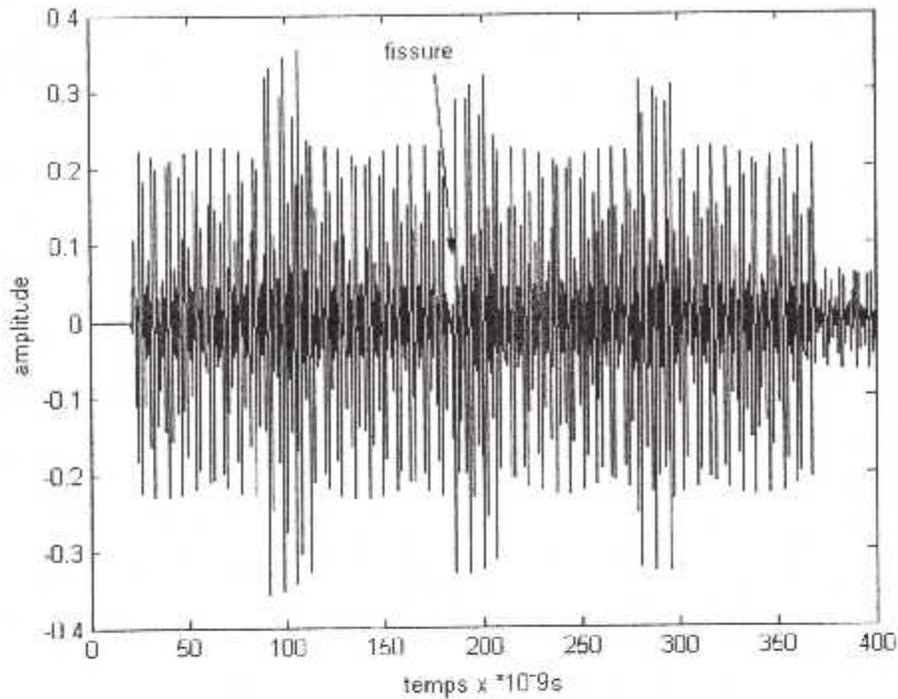


Figure 4-12: Courbe de signal réfléchi pour un décollement des couches.

On remarque que une zone de perturbation s'est infiltrée entre la zone représentative et la 2<sup>ème</sup> couche de matrice est celle de la 2<sup>ème</sup> couche de fibre.

#### 4.2.2.5 Cas d'un matériau conducteur :

On maintien les même paramètres de contrôle pour un matériau conducteur, le signale résultant est :

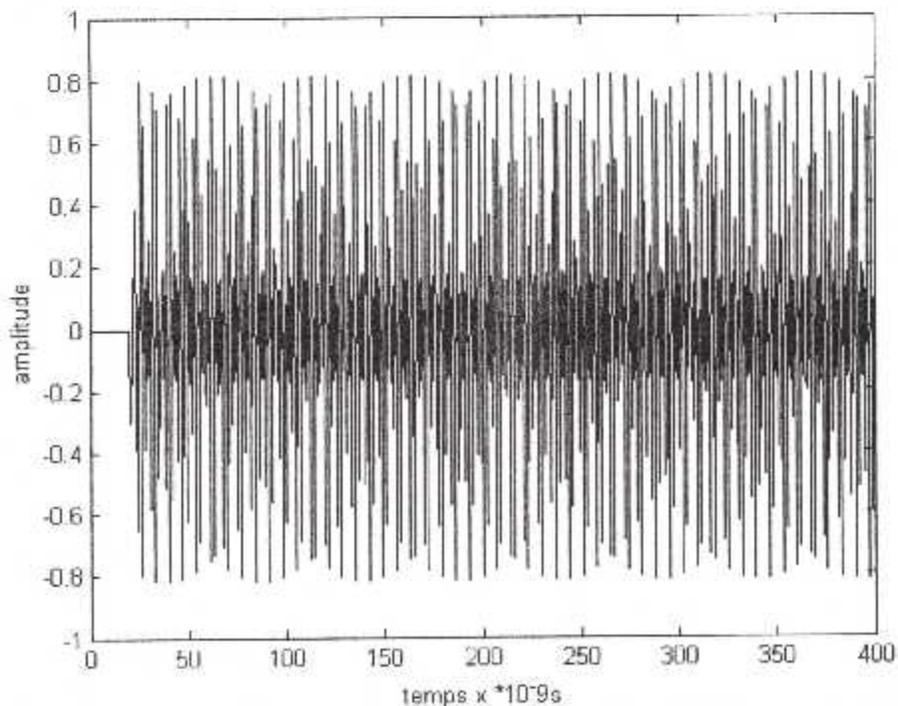


Figure 4-13: Courbe de signale réfléchi pour un matériau conducteur

On remarque qu'il n'y a pas de variation d'amplitude qui caractérise le changement de milieu. Le signal d'excitation a été complètement réfléchi sur la surface du matériau conducteur.

#### 4.2.2.6 Cas d'un revêtement diélectrique sur un matériau conducteur :

Un revêtement diélectrique sur un matériau conducteur peut être le cas d'une couche de peinture sur une tôle d'aluminium,

- Cas d'une couche de peinture de 0.5mm, possédant une permittivité relative de  $\epsilon_r = 2.54$ , recouvrant un matériau conducteur, le signal obtenu est :

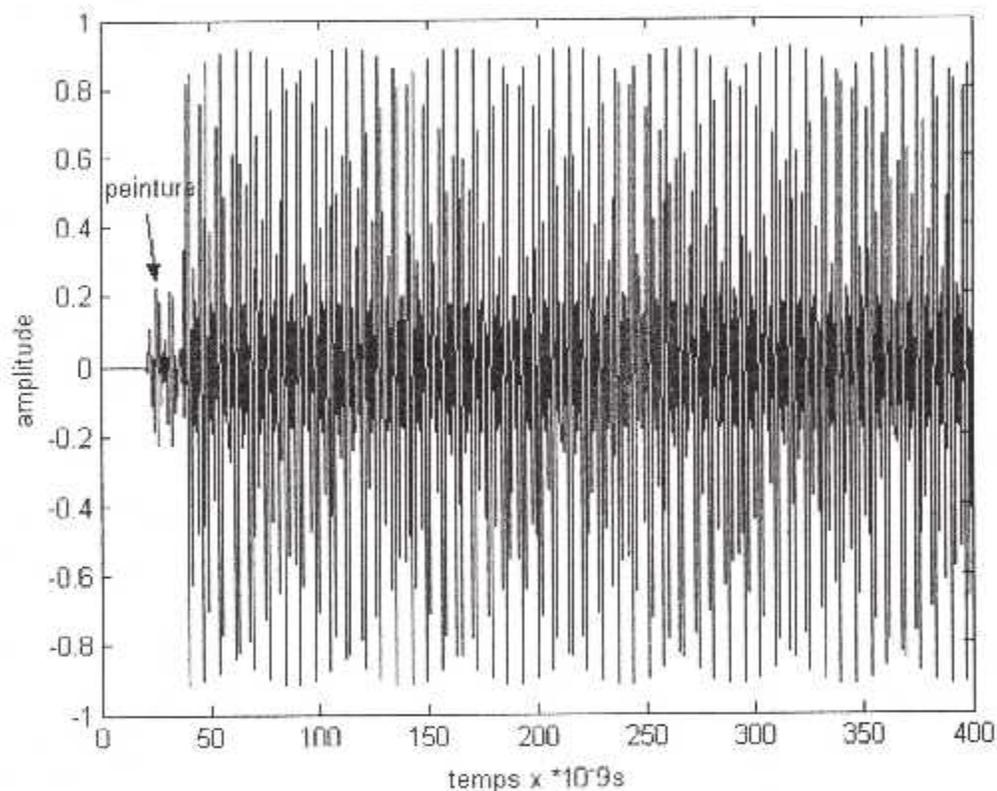


Figure 4-14 : courbe du signal réfléchi pour une couche de peinture de 1mm.

On remarque une variation d'amplitude située au début du signal, qui correspond à la couche de peinture. Elle est suivie directement par le signal de l'échos de fond. L'épaisseur du revêtement est déterminée par le temps de cette variation.

- Cas d'une couche de peinture de 0.1mm, possédant une permittivité relative de  $\epsilon_r = 2.54$ , recouvrant un matériau conducteur, le signal obtenu est :

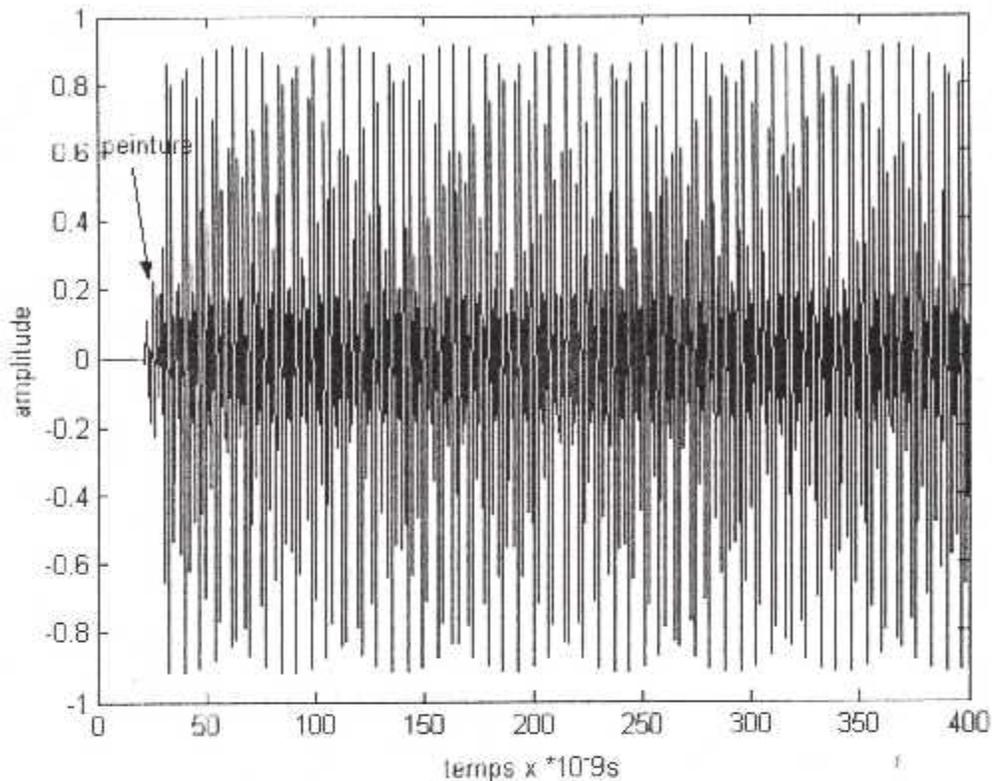


Figure 4-15 : Courbe du signal réfléchi pour une couche de peinture de 0.1mm

Sur cette courbe, la variation d'amplitude est toujours présente, mais elle est de courte durée par rapport à celle observée sur la courbe précédente. Ce temps caractérise l'épaisseur de la couche de peinture.

#### 4.2.3 Observation générale :

Les courbes représentatives des signaux réfléchis obtenues sur les différentes applications étudiées, présente une même allure que celle de la structure étudiée. L'échantillonnage fait sur le matériau sain, permet de se prononcer sur l'éventuelle présence d'anomalie.

Une fissure, est équivalente à l'intégration d'un autre milieu, dont la nature détermine l'amplitude du signal. La diminution de son épaisseur réduit la taille de la zone correspondante, sans pour autant changer l'amplitude.

Ces applications donnent une idée sur le type de signal réfléchi qu'on peut avoir, à partir d'une mesure réelle, au respect des hypothèses posées (milieu sans amortissement).

# Conclusion

Notre étude nous a permis de mettre en évidence plusieurs paramètres dans le contrôle par micro-ondes. Grâce à la simulation du signal, nous avons pu reconstituer les signaux résultants lors du contrôle des composites par les micro-ondes, nous pouvant conclure que :

- L'interaction des micro-ondes avec les composites permet de détecter toute variation dans sa structure.
- La perturbation du signal réfléchi due à une anomalie est nettement visible, ce qui permet la différenciation entre les types de défauts.
- Cette différence correspond à un changement de milieu lorsqu'il s'agit d'une variation d'amplitude. Elle correspond à la variation d'épaisseur qu'on observe une variation dans le temps de propagation.
- La correspondance temps distance ne permet pas seulement la mesure d'épaisseur, mais aussi la localisation de défauts.
- La nature du signal réfléchi (sinusoïdal, impulsion,...) est fonction de la nature du signal d'excitation, défini par le type d'information recherché.
- La précision de la méthode est fonction de la longueur d'onde utilisée.

Ce qui nous permet de détecter :

- ✓ Le changement de milieu.
- ✓ Des fissures de l'ordre de  $100\mu\text{m}$ .
- ✓ Le décollement entre couche de matrice et de renfort.
- ✓ La mesure d'épaisseur.

Ce travail entre dans le cadre des projets de recherche du CSC, pour le développement et la promotion de cette technique, cette mémoire est une première approche dans ce domaine.

Ce qui nous a permis de :

- ✓ De travailler dans une équipe de recherche.
- ✓ D'approfondir nos connaissances dans le domaine des composites, les micro-ondes et le CND.
- ✓ La maîtrise du logiciel **Matlab**.
- ✓ L'initiation au travail de recherche.

Vehicule

Annexe

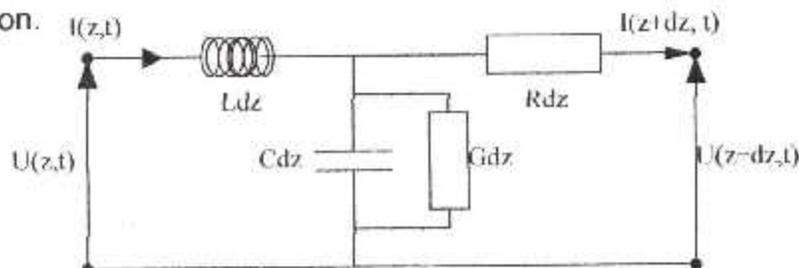
## 1. Bandes normalisées des micro-ondes

Bande	Fréquences (GHz)
P	230 MHz - 1 GHz
L	1 - 2 GHz
S	2 - 4 GHz
C	4 - 8GHz
X	8 - 12.5 GHz
Ku	12.5 - 18 GHz
K	18 - 26.5 GHz
Ka	26.5 - 40 GHz
Q	33 - 50 GHz
U	40 - 60 GHz
V	50 - 75 GHz
E	60 - 90 GHz
W	75 - 110 GHz
F	90 - 140 GHz
D	110 - 170 GHz
G	140 - 220 GHz
Y	170 - 260 GHz
J	220 - 325 GHz

## 2. Modélisation de la propagation de micro-ondes dans les matériaux:

A partir d'une étude faite sur la modélisation de la propagation de micro-ondes dans le sol afin d'obtenir un profil hydrique. On a établi un modèle de propagation des micro-ondes dans les matériaux. Pour retrouver cette relation, on applique les lois des lignes de transmission et on calcule pour chacun d'eux les tensions des ondes transmises et réfléchis. Les guides d'ondes sont représentés par leur circuit électrique équivalent caractériser par les paramètres  $R_0$ ,  $L_0$ ,  $C_0$ ,  $G_0$ .

Le schéma ci-dessous correspond à chaque segment du milieu de propagation de longueur  $\delta z$  se trouvant dans le guide d'onde caractériser par une valeur de résistance  $R\delta z$ , d'inductance  $L\delta z$ , de capacité  $C\delta z$ , et de conductance  $G\delta z$ , sachant que ces derniers sont des constantes réparties par unité de longueur. L'assemblage en série de ces différents schémas élémentaires donne l'ensemble du milieu de propagation.

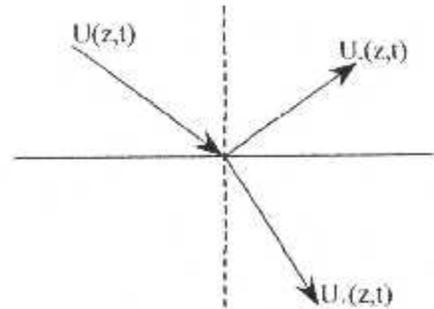


### Equations des lignes des transmissions :

Ces équations sont établies sous réserve des hypothèses suivantes :

1. Les paramètres caractéristiques  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $G$  du milieu de propagation sont stationnaires.
2. Le milieu satisfait la condition de non-distorsion.
3. Milieu homogène.
4. Milieu lentement variable.

La tension de l'onde électromagnétique est la superposition de la tension de l'onde directe ou transmise  $U_+$  (se propageant dans le sens des  $z$  positifs) et de la tension de l'onde inverse ou réfléchie  $U_-$  (qui se propage en sens inverse) :



$$\text{On pose : } \begin{cases} U(z,t) = U_+(z,t) + U_-(z,t) \\ I(z,t) = Y(z,t)[U_+(z,t) - U_-(z,t)] \end{cases} \dots\dots\dots(1)$$

Avec  $Y(z)$  : l'admittance.

On appliquant aux schémas précédant les équations des lignes en chaque point  $z$  et à chaque instant  $t$ , on trouve en respectant la 1<sup>ère</sup> hypothèse :

$$\begin{cases} \frac{\partial U(z,t)}{\partial z} = -R(z)I(z,t) - L(z)\frac{\partial I}{\partial t} \\ \frac{\partial I(z,t)}{\partial z} = -G(z)U(z,t) - C(z)\frac{\partial U(z,t)}{\partial t} \end{cases} \dots\dots\dots(2)$$

Le système devient :

$$\begin{cases} \frac{\partial (U_+ + U_-)(z,t)}{\partial z} = -R(z)Y(z)(U_+ + U_-)(z,t) - L(z)\frac{\partial Y(z)(U_+ + U_-)(z,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial Y(z)(U_+ + U_-)(z,t)}{\partial z} = -G(z)(U_+ + U_-)(z,t) - C(z)\frac{\partial Y(z)(U_+ + U_-)(z,t)}{\partial t} \end{cases} \dots\dots\dots(3)$$

Nous pouvant le mettre sous la forme :

$$\begin{cases} \left( \frac{\partial U_+}{\partial z} + LY \frac{\partial U_+}{\partial t} \right) + \left( \frac{\partial U_-}{\partial z} - LY \frac{\partial U_-}{\partial t} \right) = -RY(U_+ + U_-) \\ \left( \frac{\partial U_+}{\partial z} + \frac{C}{Y} \frac{\partial U_+}{\partial t} \right) - \left( \frac{\partial U_-}{\partial z} - \frac{C}{Y} \frac{\partial U_-}{\partial t} \right) = \left( -\frac{G}{Y} - \frac{\partial Y}{Y \partial z} \right) U_+ + \left( -\frac{G}{Y} + \frac{\partial Y}{Y \partial z} \right) U_- \end{cases} \dots\dots\dots(4)$$

L'hypothèse 2 nous aide à simplifier la résolution de ce système, elle a comme conséquence :  $\frac{G}{Y} = RY$ . De là, le système devient après quelque arrangement :

$$\begin{cases} \left( \frac{\partial U_+}{\partial z} + LY \frac{\partial U_+}{\partial t} \right) = \frac{1}{2} \left[ U_+ \left( -\frac{G}{Y} - RY - \frac{\partial Y}{Y \partial z} \right) + U_- \left( -\frac{G}{Y} - RY - \frac{\partial Y}{Y \partial z} \right) \right] \\ \left( \frac{\partial U_-}{\partial z} + LY \frac{\partial U_-}{\partial t} \right) = \frac{1}{2} \left[ U_+ \left( -\frac{G}{Y} - RY - \frac{\partial Y}{Y \partial z} \right) + U_- \left( -\frac{G}{Y} - RY - \frac{\partial Y}{Y \partial z} \right) \right] \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

On identifie la vitesse de propagation des ondes  $U_+$  et  $U_-$  à l'abscisse  $z$  par :

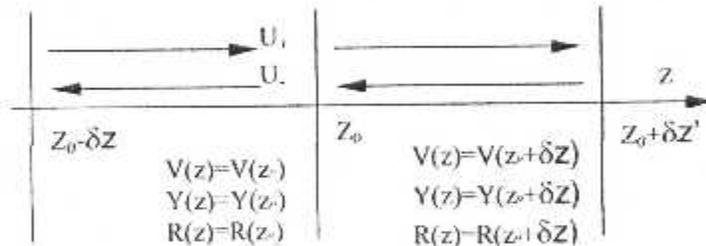
$$\frac{1}{v} = LY = \frac{C}{Y} \text{ alors :}$$

$$\begin{cases} \left( \frac{\partial U_+}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial U_+}{\partial t} \right) = \frac{1}{2} \left[ U_+ \left( -2RY - \frac{\partial \ln Y}{\partial z} \right) + U_- \frac{\partial \ln Y}{\partial z} \right] \\ \left( \frac{\partial U_-}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial U_-}{\partial t} \right) = \frac{1}{2} \left[ U_+ \frac{\partial \ln Y}{\partial z} + U_- \left( -2RY - \frac{\partial \ln Y}{\partial z} \right) \right] \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

Pour la résolution de ce système on utilise la transformé de Laplace et remplacer  $U_{\pm}(z,t)$  par sa transformée  $\hat{U}_{\pm}(z, p)$ , le système devient :

$$\begin{cases} \frac{\partial \hat{U}_+}{\partial z} + \hat{U}_+ \left( \frac{p}{v} + RY + \frac{1}{2} \frac{\partial \ln Y}{\partial z} \right) = \frac{1}{2} \frac{\partial \ln Y}{\partial z} \hat{U}_- \\ \frac{\partial \hat{U}_-}{\partial z} + \hat{U}_- \left( \frac{p}{v} + RY - \frac{1}{2} \frac{\partial \ln Y}{\partial z} \right) = \frac{1}{2} \frac{\partial \ln Y}{\partial z} \hat{U}_+ \end{cases} \dots\dots\dots(7)$$

On transposant ces équations sur l'intervalle  $[z_0 - \delta z, z_0]$  d'une part et sur l'intervalle  $[z_0, z_0 + \delta z]$  d'autre part ( $\delta z$  représente un segment de ligne de propagation qu'on considère comme un accroissement de  $z$ ) voir figure.



D'après l'hypothèse (3)  $\delta z$  est suffisamment petit devant la longueur de la ligne pour considérer :  $\frac{d \ln Y}{dz} = 0$ .

On à alors :

$$\begin{cases} \frac{d \hat{U}_+}{\hat{U}_+} = - \left( \frac{p}{v} + RY \right) dz \\ \frac{d \hat{U}_-}{\hat{U}_-} = \left( \frac{p}{v} + RY \right) dz \end{cases} \dots\dots\dots(8)$$

Les solutions générales sont :

Pour :  $z \in [z_0 - \delta z, z_0]$   $v(z) = v(z_0)$ ,  $Y(z) = Y(z_0)$ ,  $R(z) = R(z_0)$

$$\begin{cases} \hat{U}_+(z, p) = \hat{U}_+(z_0 - \delta z, p) e^{-\left(\frac{p}{v(z_0)} + RY(z_0)\right)(z - z_0, \delta z)} \\ \hat{U}_-(z, p) = \hat{U}_-(z_0, p) e^{-\left(\frac{p}{v(z_0)} + RY(z_0)\right)(z - z_0)} \end{cases} \dots\dots\dots(9)$$

Pour :  $z \in [z_0, z_0 + \delta z]$ ,  $v(z) = v(z_0 + \delta z')$ ,  $Y(z) = Y(z_0 + \delta z')$ ,  $R(z) = R(z_0 + \delta z')$

$$\begin{cases} \hat{U}_+(z, p) = \hat{U}_+(z_0, p) e^{-\left(\frac{p}{v(z_0 + \delta z')} + RY(z_0 + \delta z')\right)(z - z_0)} \\ \hat{U}_-(z, p) = \hat{U}_-(z_0 + \delta z', p) e^{-\left(\frac{p}{v(z_0 + \delta z')} + RY(z_0 + \delta z')\right)(z - z_0 + \delta z')} \end{cases} \dots\dots\dots(10)$$

Au niveau de la frontière entre les deux domaines choisi on à une continuité de tension et de courant, c.à.d :  $\begin{cases} \hat{U}(z_0^-, p) = \hat{U}(z_0^+, p) \\ \hat{I}(z_0^-, p) = \hat{I}(z_0^+, p) \end{cases} \dots\dots\dots(11)$

Ce qui implique à partir des systèmes 8 a,b on trouve :

$$\begin{cases} \hat{U}_+(z_0 - \delta z, p) e^{-\left(\frac{p}{v(z_0)} + RY(z_0)\right)\delta z} + \hat{U}_-(z_0, p) \\ = \hat{U}_+(z_0, p) + \hat{U}_+(z_0 - \delta z', p) e^{-\left(\frac{p}{v(z_0 + \delta z')} + RY(z_0 + \delta z')\right)\delta z'} \\ Y(z_0) \left[ \hat{U}_+(z_0 - \delta z, p) e^{-\left(\frac{p}{v(z_0)} + RY(z_0)\right)\delta z} - \hat{U}_-(z_0, p) \right] \\ = Y(z_0 + \delta z') \left[ \hat{U}_+(z_0, p) - \hat{U}_-(z_0 + \delta z', p) e^{-\left(\frac{p}{v(z_0 + \delta z')} + RY(z_0 + \delta z')\right)\delta z'} \right] \end{cases} \dots\dots\dots(12)$$

Après manipulation de ces équations on trouve :

$$\begin{cases} \hat{U}_+(z_0, p) = \left( 1 - \frac{\delta z'}{2} \left( \frac{d \ln Y}{dz} \right)_{z_0} \right) \hat{U}_+(z_0 - \delta z, p) e^{-\left(\frac{p}{v(z_0)} + RY(z_0)\right)\delta z} + \\ \frac{\delta z'}{2} \left( \frac{d \ln Y}{dz} \right)_{z_0} \hat{U}_-(z_0 + \delta z', p) e^{-\left(\frac{p}{v(z_0 + \delta z')} + RY(z_0 + \delta z')\right)\delta z'} \\ \hat{U}_-(z_0, p) = -\frac{\delta z'}{2} \left( \frac{d \ln Y}{dz} \right)_{z_0} \hat{U}_+(z_0 - \delta z, p) e^{-\left(\frac{p}{v(z_0)} + RY(z_0)\right)\delta z} + \\ \left( 1 + \frac{\delta z'}{2} \left( \frac{d \ln Y}{dz} \right)_{z_0} \right) \hat{U}_-(z_0 + \delta z', p) e^{-\left(\frac{p}{v(z_0 + \delta z')} + RY(z_0 + \delta z')\right)\delta z'} \end{cases} \dots\dots\dots(13)$$

La transformée de Laplace inverse de  $\hat{U}_+(z_0, p) e^{-\frac{p}{v(z_0)} t}$  est  $U\left(z_0, t - \frac{\delta z}{v(z_0)}\right)$ .

On à donc :

$$\left\{ \begin{aligned}
 U_+(z_0, t) &= \left( 1 - \frac{\delta z'}{2} \left( \frac{d \ln Y}{dz} \right)_{z_0} \right) U \left( z_0 - \delta z, t - \frac{\delta z}{v(z_0)} \right) e^{-RY(z_0)\delta z} + \\
 &\quad \frac{\delta z'}{2} \left( \frac{d \ln Y}{dz} \right)_{z_0} \hat{U}_- \left( z_0 + \delta z', t - \frac{\delta z'}{v(z_0 + \delta z')} \right) e^{-RY(z_0 + \delta z')\delta z'} \\
 U_-(z_0, t) &= -\frac{\delta z'}{2} \left( \frac{d \ln Y}{dz} \right)_{z_0} U \left( z_0 - \delta z, \frac{\delta z}{v(z_0)} \right) e^{-RY(z_0)\delta z} + \dots \dots \dots (14) \\
 &\quad \left( 1 + \frac{\delta z'}{2} \left( \frac{d \ln Y}{dz} \right)_{z_0} \right) U_- \left( z_0 + \delta z', \frac{\delta z'}{v(z_0 + \delta z')} \right) e^{-RY(z_0 + \delta z')\delta z'}
 \end{aligned} \right.$$

On pose :  $-\frac{1}{2} \left( \frac{d \ln Y}{dz} \right)_{z_0} = \rho(z_0)$

Soit encore :  $\rho(z_0) = -\frac{1}{2} \frac{d}{dz} \left[ \ln \frac{Z_{ref}}{Z(z_0)} \right] = \frac{1}{2Z(z_0)} \left( \frac{dZ}{dz} \right)_{z_0}$

Ou :  $Z(z_0)$  est l'impédance linéique à la cote  $z_0$ .  
 $Z_{ref}$  : une valeur d'impédance de référence introduite pour des raisons d'homogénéité des équations.

$\rho(z_0)$  est le coefficient linéique de réflexion de la ligne à la cote  $z_0$ , et puisque nous travaillons sur un milieu discrétisé, nous pouvons écrire au 1<sup>er</sup> ordre :

$$\rho(z) = \frac{\delta Z(z)}{2Z(z)\delta z}$$

On terme d'indice de segments, on se rapproche de la forme la plus

répondue :  $\rho_{r,l} = \frac{Z_{r+1} - Z_r}{Z_{r+1} + Z_r}$

Le système s'écrit :

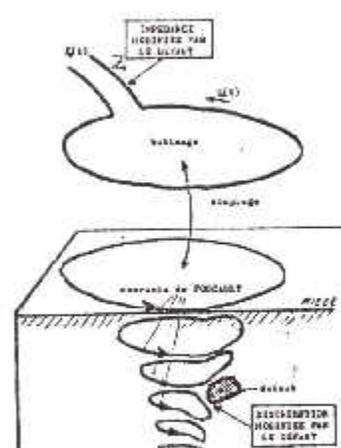
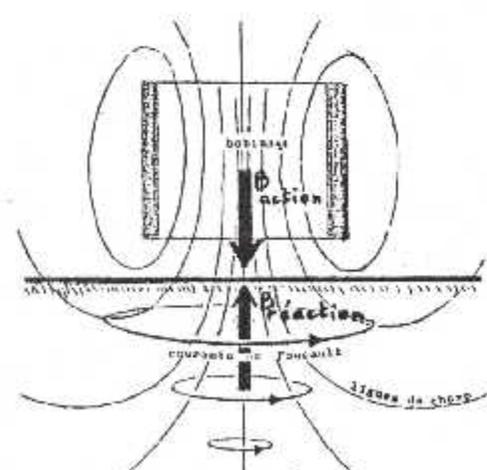
$$\left\{ \begin{aligned}
 U_+(z_0, t) &= (1 + \rho(z_0)\delta z') U \left( z_0 - \delta z, t - \frac{\delta z}{v(z_0)} \right) e^{RY(z_0)\delta z} - \\
 &\quad \rho(z_0)\delta z' \hat{U}_- \left( z_0 + \delta z', t - \frac{\delta z'}{v(z_0 + \delta z')} \right) e^{-RY(z_0 + \delta z')\delta z'} \\
 U_-(z_0, t) &= \rho(z_0)\delta z' U \left( z_0 - \delta z, \frac{\delta z}{v(z_0)} \right) e^{RY(z_0)\delta z} + \dots \dots \dots (15) \\
 &\quad (1 - \rho(z_0)\delta z') U_- \left( z_0 + \delta z', \frac{\delta z'}{v(z_0 + \delta z')} \right) e^{-RY(z_0 + \delta z')\delta z'}
 \end{aligned} \right.$$

Le facteur exponentiel est un terme d'amortissement, ici sans dispersion, qui peut s'écrire sous la forme :  $\alpha(z) = \text{constante} \cdot R(z) \sqrt{\epsilon_r(z)}$ .

### 3. Principe de base des différentes méthodes du CND :

La magnétoscopie	
Principe de base	Avantages
<p>Le contrôle par des particules magnétiques est employé pour le contrôle des matériaux qui peuvent être facilement magnétisés (matériaux ferromagnétiques). Cette méthode est capable de détecter des défauts de surface et sub-surface. Dans cette méthode le spécimen d'essai est d'abord magnétisé en utilisant un aimant permanent ou un électro-aimant ou par passage de courant électrique par ou autour du spécimen.</p> <p>Le champ magnétique présenté ainsi dans le spécimen se compose de lignes de force magnétiques. Toute anomalie va interrompre l'écoulement des lignes de champs, certaines de ces lignes doivent sortir et réintroduire le spécimen. Ces points de sortie et recentrée forment des pôles magnétiques.</p> <p>Toutes les fois que des particules magnétiques minuscules sont arrosées sur la surface d'un tel spécimen, ces particules sont attirées par ces pôles magnétiques pour créer une indication visuelle rapprochant la taille et la forme de la paille. La figure 1.3 illustre les principes de base de cette méthode.</p> <p>Selon l'application, il y a différentes techniques de magnétisation utilisées dans le contrôle par magnétoscopie. Ces techniques peuvent être groupées dans les deux catégories suivantes :</p> <p>- <b>Techniques de courant continu</b> : Ce sont les techniques dans lesquelles le courant traverse le spécimen d'essai et le champ magnétique produit par cet écoulement du courant est employé pour la détection des défauts. Ces techniques sont montrées sur la figure 1.4 (a, b et c).</p> <p>- <b>Techniques magnétiques d'écoulement de flux</b> : Dans ces techniques le flux magnétique est induit dans le spécimen par l'utilisation d'un aimant permanent ou par le courant débordant par un enroulement ou un conducteur. Ces techniques sont montrées sur la figure 1.4 (d,g)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les défauts sous-jacents peuvent être détectés (de 1 à 2 mm à partir de la surface).</li> <li>• Il existe plusieurs méthodes d'aimantation.</li> <li>• les défauts peuvent être obstrués (oxyde, calamine,...)</li> </ul>
	Inconvénients
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Applicable que pour les matériaux ferromagnétiques.</li> <li>• Difficile de mettre en œuvre pour des pièces très grandes, ou de forme complexe.</li> <li>• Risque d'amorçage d'arc et d'échauffement des pièces en surface au niveau des contacts électriques (méthode directe).</li> <li>• Nécessité de démagnétiser et de nettoyer les pièces .</li> </ul>
	Schéma explicatif
	<p>Le schéma explicatif illustre plusieurs méthodes de magnétisation :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>En haut, un aimant permanent (N-S) avec des lignes de champ magnétique traversant un objet.</li> <li>En dessous, un aimant permanent (S-N) avec un "Air gap" (espace d'air) au-dessus d'un objet, montrant comment le champ se concentre à travers l'objet.</li> <li>Ensuite, un objet cylindrique avec un courant qui le traverse, créant un champ magnétique circulaire.</li> <li>Ensuite, un objet cylindrique avec un "Test article" et un "Flux" qui le traverse, avec des "Pôles" indiqués.</li> <li>Ensuite, un objet cylindrique avec un "Current" qui le traverse, créant un champ magnétique circulaire.</li> <li>Ensuite, un objet cylindrique avec un "Core" (noyau) et un "Flux" qui le traverse.</li> <li>Enfin, un objet cylindrique avec un "Electro-magnet" (électro-aimant) et un "Test article" qui le traverse, avec un "Flux" qui le traverse.</li> </ul>

## Les courants de Foucault

Principe de base	Avantages
<p>Il consiste à soumettre la pièce à contrôler à un champ magnétique variable dans le temps, de manière à induire des courants dans le matériau.</p> <p>La présence d'un défaut en regard d'une des bobines modifie la répartition des courants induits et provoque un déséquilibre du système. L'œil observe sur l'écran de visualisation une signature caractéristique du signal de déséquilibre au passage du défaut dans les bobines.</p> <p>La répartition des courants de Foucault va dépendre de la nature du matériau (conductivité, perméabilité), de la forme et de la dimension des pièces, de la position relative de la pièce par rapport au capteur (bobinage) et des caractéristiques du courant inducteur (intensité, fréquence).</p> <p>Toute discontinuité dans le matériau (changements dimensionnels, variations de perméabilité et/ou de conductivité, présence de défauts tels que fissures, arrachements, etc. qui se présente devant le capteur, modifie le parcours ou l'intensité des courants de Foucault (figure 2)</p> <p>Cette modification s'observera soit par la mesure du flux résultant dans la bobine d'excitation, ce qui revient à mesurer sa variation d'impédance, soit par la mesure de la force électromotrice (f.e.m.) induite dans une seconde bobine de détection placée dans l'induction créée par la bobine excitatrice.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simple d'application.</li> <li>• Très bonne précision.</li> </ul>
	Inconvénients
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limité aux matériaux conducteurs.</li> <li>• Ne pouvant aller que sur quelques millimètres de profondeurs.</li> </ul>
	Schéma explicatif
	 <p>Figure(2): modification des courant de Foucault par un défaut</p>
	 <p>Figure(1): Principe général des courants de Foucault</p>

## Le ressuage

Principe de base	Avantages
<p>C'est une méthode qui peut être utilisée pour la détection des défauts débouchons à la surface dans n'importe quel produit industriel qui est fait à partir d'un matériel non poreux.</p> <p>Cette méthode est largement répandue pour l'essai des matériaux non magnétiques. Dans cette méthode un pénétrant liquide est appliqué à la surface du produit pendant un certain temps prédéterminé, après quoi le pénétrant excessif est enlevé de la surface.</p> <p>La surface est alors séchée et un révélateur est appliqué à son tour. Le pénétrant qui reste dans la discontinuité est absorbé par le révélateur pour indiquer la présence aussi bien que l'endroit, la taille et la nature de la discontinuité. Le processus est illustré sur la figure 1.2 (a) et (b).</p> <p>Les pénétrants utilisés sont des pénétrants colorant ou pénétrant fluorescent. L'inspection pour le premier type se fait sous la lumière blanche tandis que l'inspection dans le second cas est faite sous la lumière ultraviolette (ou noir) dans des conditions obscurcies.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativement à prix réduit.</li> <li>• Méthode fortement portable.</li> <li>• Extrêmement sensible aux discontinuités fines et serrées.</li> <li>• Méthode assez simple.</li> <li>• Peut être employé sur une variété de matériaux.</li> <li>• Toutes les discontinuités extérieures sont détectées dans une opération, indépendamment de l'orientation.</li> </ul>
	Inconvénients
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exige une bonne propreté.</li> <li>• Détecte les discontinuités extérieures seulement.</li> <li>• Pas adapté pour les spécimens poreux et les surfaces très approximatives.</li> <li>• Le déplacement de tous les matériaux pénétrants, suivant l'essai, est souvent exigé.</li> </ul>
	Schéma explicatif

## La radiographie

Principe de base	Avantages
<p>Les radiographies X et <math>\gamma</math> sont des procédés majeurs du contrôle non destructif industriel. Comme l'examen par ultrasons, elles permettent de découvrir essentiellement des défauts internes. Elles ne concurrencent pas cependant cette dernière technique et doivent lui être considérées comme complémentaires, cette complémentarité étant en fait un trait commun à toutes les méthodes, aucune d'elles n'étant bien sûr universelle.</p> <p>La quasi-totalité des matériaux peut être examinée en radiographie, les épaisseurs contrôlées pouvant souvent être importantes. Les applications sont donc nombreuses et concernent tous les domaines d'activité, allant de la chaudronnerie lourde à l'électronique, en passant par l'industrie alimentaire, les moyens mis en œuvre étant bien évidemment différents alors que le principe de base demeure le même : former une image qui traduit l'absorption subie par un rayonnement ionisant qui a traversé l'objet examiné.</p> <p>La pièce P est interposée entre la source de rayonnement et le film photographique. Une image latente se forme sur le film après exposition du rayonnement pendant un temps donné.</p> <p>Après développement, le film, convenablement éclairé, est interprété par l'œil.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode se prête bien à la détection des défauts localisés dans le volume de la pièce et permet une bonne définition des défauts.</li> <li>• La nature des défauts décelés peut être appréciée et l'archivage des résultats est garanti par la présence du cliché.</li> </ul>
	Inconvénients
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode est coûteuse en investissement et développement des films et nécessite le respect des règles de sécurité en vigueur pour le personnel soumis aux rayonnements ionisants.</li> <li>• La pénétration du rayonnement est limitée et la source doit être sélectionnée en fonction de l'épaisseur du matériau à contrôler.</li> <li>• La localisation de l'anomalie dans la section n'est pas garantie.</li> <li>• La sensibilité de la méthode est influencée par l'orientation de la surface du défaut vis-à-vis de la direction principale du rayonnement émis par la source.</li> </ul>
	Schéma explicatif
	<p>Le schéma illustre le principe de la radiographie en trois étapes. En haut, une source de rayonnement émet des rayons qui traversent une pièce P (représentée par un rectangle hachuré) et frappent un film I (représenté par un rectangle blanc). En bas, l'œil O observe le film I, qui a enregistré l'image latente.</p>

## Les ultrasons

### Principe de base

Un transducteur émet une onde ultrasonore qui se propage dans le matériau à contrôler et qui se réfléchit sur les obstacles présents (défauts, limites de pièce...). Cet écho peut revenir en direction du transducteur qui joue alors le rôle de récepteurs.

Comme les vitesses de propagation des ondes ultrasonores sont très grandes (par exemple 5.940 m/s pour les ondes longitudinales dans l'acier) et que les distances parcourues sont petites (quelques millimètres à quelques centaines de millimètres), le signal d'émission et les échos sont très voisins (l'écart de temps entre ces signaux étant de l'ordre des dizaines de micro secondes).

Il est donc nécessaire d'utiliser un appareil de contrôle qui, en plus de l'alimentation du transducteur, permet la visualisation des échos ultrasonores sur un tube d'écran cathodique ; le déplacement horizontal correspond au temps de propagation de l'onde, le déplacement vertical à son amplitude.

Cet appareil de contrôle permet la visualisation de l'émission et des échos recueillis par le transducteur. Pour que la reconnaissance des échos soit possible, il ne faut pas qu'il y ait chevauchement entre l'émission et les différents échos ; il faut donc que les signaux émis soient très brefs, de l'ordre de quelques micros secondes.

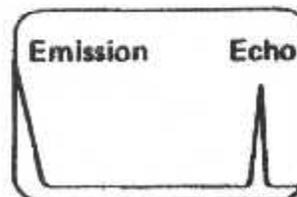
### Avantages

- La méthode permet la détection des défauts localisés dans le volume de la pièce et présente une grande sensibilité, notamment pour la recherche de défauts plans.
- Elle peut être utilisée indifféremment sur chantier ou en atelier et se prête bien à l'automatisation.

### Inconvénients

- La sensibilité de la méthode est fortement influencée par l'orientation de la surface du défaut vis-à-vis de la direction principale du faisceau acoustique.
- Il est nécessaire d'interposer un milieu de couplage intermédiaire entre le transducteur et la pièce pour assurer la continuité de la propagation.
- L'interprétation de la nature des défauts et de leur dimension nécessite du personnel qualifié ayant une grande expérience. La mise en œuvre est difficile sur certains matériaux.

### Schéma explicatif



## L'émission acoustique

### Principe de base

L'EA est un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau soumis à sollicitation. Autrement dit, l'EA est analogue à l'activité sismique enregistrée sur la terre, activité révélatrice de ruptures localisées de l'écorce terrestre par suite d'accumulations de contraintes dépassant la résistance du matériau.

La détection et l'analyse des signaux d'EA permettent d'obtenir des informations inédites sur les anomalies du champ de contraintes, liées par exemple à la présence de défauts. Elle diffère des techniques usuelles de contrôle non destructif pour plusieurs raisons

Le matériau génère lui-même le signal à analyser ; ceci implique qu'il est essentiel de prendre en compte les caractéristiques mécaniques et métallurgiques du matériau avant d'envisager une application de l'EA ; un signal d'EA ne peut être obtenu que si la structure soit sollicitée ; Dans ces conditions, seuls les défauts actifs peuvent être détectés ; l'état de contraintes autour du défaut est donc essentiel.

L'EA peut révéler la présence d'un défaut, voire donner sa position et parfois, si les données de référence sont suffisantes, graduer sa nocivité ; en aucun cas, l'EA ne vise à décrire la géométrie du défaut (profondeur, largeur, longueur, forme...) ; Une structure de grande dimension est contrôlable par l'EA en une seule opération au moyen d'un nombre limité de capteurs ; il n'est pas nécessaire que les zones critiques à contrôler soient accessibles directement .

Sous l'action de la contrainte mécanique, un début de fissuration s'organise dans l'éprouvette au point C. La fissure se comporte comme une source d'émission de bruit ultrasonore détecté par le traducteur (t) placé en bout de l'éprouvette. La révélation s'apparente à celle pratiquée pour la technique des ultrasons.

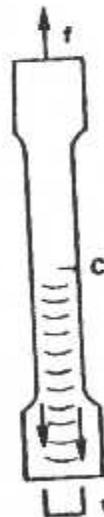
### Avantages

- La méthode est bien adaptée à un suivi en fonctionnement.
- Elle ne nécessite pas de démontage.
- La sensibilité est telle que des événements apparaissant avant la fissuration puissent être décelés.
- L'évolution de la fissuration peut être quantifiée.
- La méthode est globale.

### Inconvénients

- La méthode n'est applicable que si la pièce est sous contrainte.
- L'étalonnage est délicat.
- L'instrumentation est complexe

### Schéma explicatif



## 1. Programme :

```
clear all
% initiation des données
c=3*10^8;
f=300*10^9;
U=1;
teta=pi/6;
% lecture des données
epspp=input('donné les valeurs de la permittivité relative imaginaire');
epsr=input('donné le valeurs de la permittivité relative réel');
x=input('donné les différents épaisseur des couches');
teta=input('qu"elle est l"angle incidante');
t=input('donnée la fenetre de calcule');
% calcul des indice de refraction
nn=length(epsr);
for i=1:nn,
    n(i)=sqrt(epsr(i));
    v(i)=c/n(i);
end
% calcul des coefficients de reflexions
for i=1:nn-1,
    R(i)=(n(i+1)-n(i))/(n(i+1)+n(i));
end
% calcul des ondes transmises et réfléchié des angles de transmissio
    Ut(1)=U.*(1+R(1));
    Ur(1)=U*R(1);
    for i=2:nn-1,
        Ut(i)=U*prod(1+R(1:i));
        Ur(i)=Ut(i-1)*R(i)*prod(1-R(1:i-1));
        tetat(1)=asin(sin(teta)*n(1)/n(2));
        tetat(i)=asin(sin(tetat(1))*n(1)/n(i+1));
    end
% calcul du temps de retard de chaque onde
for i=1:nn-1,
    y(i)=x(i)/cos(tetat(i));
    t(i)=y(i)/v(i);
    temp(i)=2*sum(t);
    temp(i)=temp(i)*10^9.5;
    temp(i)=round(temp(i));
    for g=temp(i):1:400,
        Uf(i,g)=Ur(i)*sin(f*g);
    end
end

%calcul du signal résultant
y=sum(Uf,1);
plot(y,'k')
xlabel('temps x *10^-9s')
ylabel('amplitude')
```

## Bibliographie

1. Daniel GAY, *Matériaux composites*, Hermès 1989.
2. TEKNEA. *Matériaux composites*, "introduction à l'usage des ingénieurs et techniciens",
3. Jean WEISS et Claude BORD, *Les matériaux composites*, volume 1: , CEP Edition 1983.
4. Jean WEISS et Claude BORD, *Les matériaux composites*, volume 2: "Calculs, Essais et contrôle, Conception" , CEP Edition 1983.
5. Nadia Bahlouli, *Cour des matériaux composites* ,
6. Pierre TODOROFF, *Modélisation de la propagation de micro-ondes dans le sol afin d'obtenir un profil hydrique par réflectométrie temporelle*. Thèse de doctorat, 1998.
7. J-M BERTHELOT, *Matériaux composites "comportement mécanique et analyse des structures"*, MASSON, Paris, 1992.
8. Edward J.Rothwell et Michael J.Cloud, *Electromagnetics*. CRC Press 2001.
9. Ben Sebti, *Micro-ondes*, cour pour ingénieur, université de Blida.
10. David M.Pozar, *Microwaves engineering*, Addison-Wesley Publishing Company 1990.
11. R.Badoual, *Les micro-ondes*, Masson 1983.
12. Robert C.McMaster, *Nondestructive Testing Handbook "Electromagnetic Testing"*, second edition, ANST 1986.
13. *Généralité sur le contrôle non Dstructif*,
14. N. Lubetsky, E. Maksimovich , *MICROWAVE NONDESTRUCTIVE TESTING OF COMPOSITE MATERIALS USING POLARIZATION INTERFEROMETRY*, Institute of Applied Physics, Minsk, Belarus
15. Chin-Yung Yeh, *A MICROWAVE METHOD FOR DETECTION OF FINITE SURFACE CRACKS IN METALS* , Institute of Nuclear Energy Research.